



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Diseño de la cadena de suministro de lazo cerrado para revalorizar productos.

Trabajo realizado por:

Isabel Florido Martel

Dirigido por:

Ernest Benedito Benet

Xavier Sánchez Vila

Máster en:

Ingeniería Ambiental

Barcelona, 14 de junio de 2018

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Resumen

Los recursos que se encuentran de manera natural en el planeta se han utilizado tradicionalmente sin tener en cuenta las consecuencias ambientales que acarrearía el uso indiscriminado de los mismos, hasta el punto de que en la actualidad son cada vez más escasos.

Las cadenas de suministro permiten la conversión de los recursos naturales en productos útiles para los usuarios finales, sin embargo, estos procesos de fabricación generan un gran impacto en el planeta.

Por ello, desde los distintos gobiernos y organizaciones del planeta se han llevado a cabo políticas para proteger el medio ambiente.

Desde el punto de vista de las industrias, una forma de minimizar el impacto ambiental generado es incorporar la logística inversa en la cadena de suministro, creando así una cadena de suministro de lazo cerrado.

La logística inversa consiste en que las empresas fabricantes, ya sea por motivos económicos, legales, sociales, de marketing o por protección de activos, se encargan de recoger el producto fuera de uso y, tras su clasificación y evaluación, reprocesarlos mediante la reutilización, restauración, reparación, canibalización, reciclaje o incineración, de manera que se pueda recuperar su valor.

El diseño de la cadena de suministro es un proceso largo y complejo que supone un problema estratégico, cuya solución influencia el rendimiento de la cadena de suministro. El diseño de la cadena de suministro,

Para poder realizar el diseño de la cadena de suministro se ha decidido seguir el método Supply Chain Outline Process (SCOP) propuesto por Corominas et al. (2015). Este método sigue un enfoque jerárquico top-down, cuyo objetivo es facilitar la evaluación y selección de alternativas a los diseñadores reduciendo la cantidad de alternativas a analizar, así como compartir y entender la información de diseño.

Se han añadido una serie de consideraciones a cada una de las etapas que conforman el SCOP y se ha aplicado este proceso a dos casos de estudio: la cadena de suministro de las lavadoras y la cadena de suministro de la cerveza.

Descriptores: *Cadena de suministro de lazo cerrado, logística inversa, gestión de residuos, minimización de residuos, revalorización de productos*

Abstract

Traditionally, natural resources have been used without considering the environmental consequences that their indiscriminate use would cause, to the extent that they are currently becoming scarcer.

Supply chain converts natural resources in useful products for end users; however, these fabrication processes generate a great impact on the planet.

Therefore, environmental policies have been carried out by different governments and organizations.

From the industries point of view, a way of minimizing their environmental impact is to incorporate reverse logistics in their supply chain, creating a closed loop supply chain.

In reverse logistics the manufacturing companies, whether for economic, legal, social, marketing or asset protection, collect the end of use product, and after its classification and evaluation, they are reprocessed through the activities of reuse, refurbishment, reparation, cannibalization, recycle or incineration, so its value can be recovered.

Supply chain design is a long and complex process, that supposes a strategic problem whose solution influences the supply chain performance.

In order to carry out the supply chain design, it was decided to use the Supply Chain Outline Process (SCOP) proposed by Corominas et al. (2015). This method follows a hierarchical top-down approach, which aims to facilitate the evaluation and selection of alternatives to designers by reducing the number of alternatives to be analyzed, as well as sharing and understanding the design information.

A series of considerations have been added to each of the stages that constitute SCOP and this process has been applied to two case studies: the washing machine supply chain and the beer supply chain.

Key-words: *Closed loop supply chain, reverse logistics, waste management, waste minimization, waste revaluation.*

Tabla de contenido

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción | 10 |
| 2. Objetivos | 13 |
| 2.1. Objetivo general | 13 |
| 2.2. Objetivos específicos..... | 13 |
| 3. Cadena de suministro y cadena de suministro de lazo cerrado | 14 |
| 3.1. Motivos para aplicar la logística inversa en una cadena de suministro | 21 |
| 3.2. Actividades propias de la cadena de suministro de lazo cerrado | 23 |
| 3.3. Tipos de retorno | 25 |
| 3.4. Gestión de los residuos producidos | 27 |
| 3.5. Actores implicados..... | 28 |
| 3.6. Operaciones de reprocesado | 29 |
| 4. Diseño de redes de cadena de suministro | 32 |
| 4.1. Tipos de redes de logística inversa..... | 33 |
| 5. Metodología del diseño de la cadena de suministro..... | 42 |
| 5.1. Metodología aplicada | 45 |
| 5.2. Casos de estudio | 49 |
| 6. Conclusiones y trabajo futuro..... | 66 |
| Bibliografía | 67 |

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Tratamiento de los residuos generados en España en el año 2016. (EUROSTAT 2018) | 11 |
| Figura 2. Tratamiento de los residuos generados en Europa en el año 2016 (EUROSTAT 2018) | 11 |
| Figura 3. Estructura general de una cadena de suministro de lazo cerrado. (Fleischmann et al. 2000) | 25 |
| Figura 4. Distribución geográfica de factorías, almacenes y plataformas en España y Portugal (Egido Roldán 2012) | 51 |
| Figura 5. Gráfico-M de la cadena de suministro de lavadoras | 53 |
| Figura 6. Gráfico-m de la cadena de suministro de lavadoras. | 57 |
| Figura 7. Gráfico-M de una red de reutilización de envases | 60 |
| Figura 8. Centros productivos de Mahou San Miguel en el mundo.(Mahou San Miguel 2018) | 65 |
| Figura 9. Gráfico-m de la cadena de suministro de la cerveza | 64 |

Lista de tablas

Tabla 1. Diferencias entre la cadena de suministro tradicional y la cadena de suministro de lazo cerrado. (Guide et al. 2000)20

1. Introducción

El ser humano no utiliza las materias tal y como las encuentra en la naturaleza, sino que estas se someten a una serie de transformaciones con el objetivo de crear productos útiles

Estas transformaciones que se realizan a las materias primas para conseguir productos finales útiles conllevan un gasto energético y una emisión de gases de efecto invernadero, en mayor o menor medida, en función del producto que se quiera producir. De estas transformaciones también se obtienen una serie de residuos que, tradicionalmente, se han enviado a vertedero sin tener en cuenta las opciones de revalorización

De todo ello, y dado que el ritmo de consumo de las materias primas es muy superior al de regeneración de estas en un ecosistema natural, se puede concluir que los procesos de producción, que se han impulsado con la llegada de la globalización, contribuyen en gran medida al cambio climático, limitando la capacidad del planeta de regenerar los recursos consumidos y absorber el impacto generado y que también propician la escasez de recursos naturales en el planeta.

En un principio, la contaminación industrial no fue un tema importante de investigación, sin embargo, con la llegada de la globalización, en el siglo XX, la gestión de las cadenas de suministro ganó notoriedad. Se empezaron a usar sistemas de organización de la producción como el Just In Time (JIT) o la producción Lean, con el objetivo de minimizar los residuos generados y mejorar la eficiencia operativa, aunque no por motivos ambientales, sino económicos

La importancia de los problemas ambientales se hizo evidente para la sociedad con la publicación del libro *Silent Spring* de Rachel Carson, a la que se le atribuye el mérito de haber catalizado el movimiento ambiental en Estados Unidos entre los años 1960 y 1970. Entre las reacciones a la publicación de este libro, en el que se critican los químicos DDT y su influencia en aves y humanos, destaca la creación de la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA). (Sarkis, Zhu y Lai 2011).

Desde entonces, se han llevado a cabo, tanto desde las propias organizaciones como desde la administración pública, políticas para reducir el impacto ambiental generado por las actividades industriales.

Los fabricantes se encuentran bajo una creciente presión para recoger y reutilizar los productos viejos provenientes de los consumidores, para así minimizar las emisiones y recuperar el valor residual del producto.

En este sentido, en España desde el año 2007 hasta el 2016 se ha reducido la cantidad de residuos generados en un 23,36%, pasando de 578 kg de residuos per cápita en 2007 a 443 kg de residuos generados per cápita en el año 2016. Además, en el año 2011 se consiguió por primera vez generar menos residuos que la media de la Unión Europea, hasta el punto de que en el año 2016 se generó un 8,09% menos que la media europea, de 482 kg de residuos per cápita. (EUROSTAT 2018)

A pesar de todo esto, en el mismo año 2016, en España se envió un 53,78% más de residuos a vertedero que la media de la Unión Europea. Esta gran diferencia, permite pensar que en la fracción de residuos que se envía en España a vertedero hay una gran fracción de estos que es reciclable. En la Figura 1 y en la Figura 2 se puede observar el destino final de los residuos en España y en la Unión Europea respectivamente.

La falta de vertederos, las emisiones dañinas y el consumo de recursos no renovables han aumentado la preocupación de la sociedad por el medio ambiente, lo que ha llevado a que tanto los gobiernos como los consumidores se preocupen del tratamiento de los productos al final de su vida.

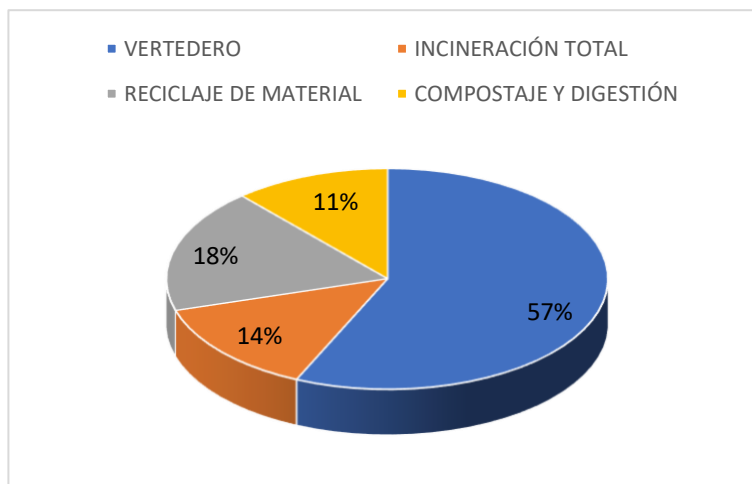


Figura 1. Tratamiento de los residuos generados en España en el año 2016. (EUROSTAT 2018)

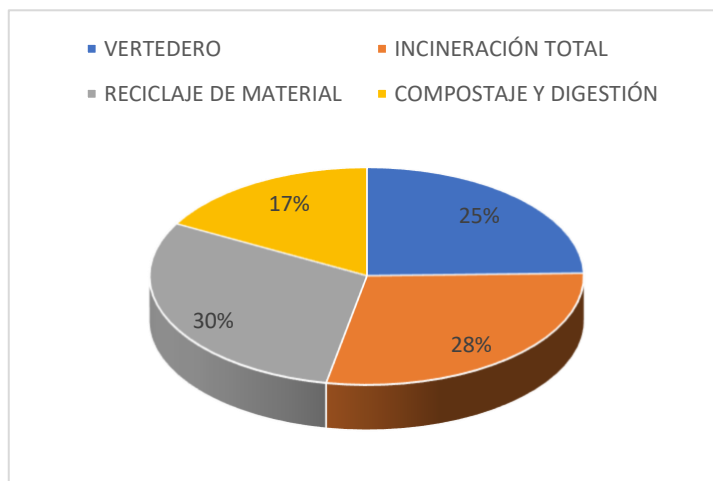


Figura 2. Tratamiento de los residuos generados en Europa en el año 2016 (EUROSTAT 2018)

La minimización de la generación de residuos implica una reducción de la contaminación, y la reducción del consumo de materias primas y de recursos, como el agua y la energía, obteniendo así una serie de beneficios que se reflejan en el balance económico de la empresa, haciéndolas más competitivas.

Como se mencionó anteriormente, los recursos no se consumen tal y como se encuentran en la naturaleza, sino que son sometidos a una serie de transformaciones con el fin de crear un producto útil. Los intercambios de materiales e información durante el proceso logístico que abarca desde la adquisición de materias primas hasta la entrega de productos terminados al usuario final es lo que se conoce como cadena de suministro. (Vitasek 2013).

Por tanto, una forma de conseguir reducir el impacto ambiental creado por los residuos generados a lo largo de la cadena de suministro a la vez que se reduce la utilización de materias primas procedentes del medio natural es aplicar la logística inversa dentro de la cadena de suministro, es decir, recoger los productos fuera de uso, y reprocesarlos para recuperar su valor.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

El objetivo de este trabajo es aplicar una metodología de diseño de cadena de suministro que sirva para reducir el impacto ambiental creado por los residuos generados a lo largo de la cadena de suministro a la vez que se reduce la utilización de materias primas procedentes de la naturaleza.

2.2. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo principal del trabajo, se han establecido una serie de objetivos específicos como son:

- Entender el funcionamiento de la cadena de suministro.
- Entender el funcionamiento de la cadena de suministro de lazo cerrado.
- Estudiar la importancia del diseño de la cadena de suministro en la producción de residuos.
- Aplicar una metodología de diseño que permita la minimización de los residuos generados.

3. Cadena de suministro y cadena de suministro de lazo cerrado

La cadena de suministro es el intercambio de materiales e información durante el proceso logístico que abarca desde la adquisición de materias primas hasta la entrega de productos terminados al usuario final. (Vitasek 2013).

La gestión de la cadena de suministro consta de tres elementos estrechamente interrelacionados: la estructura de la red de la cadena de suministro, los procesos comerciales de la cadena de suministro y los componentes de gestión de la cadena de suministro.

La estructura de las actividades y/o procesos en y entre las empresas es vital para aumentar la competitividad y la rentabilidad de la empresa. Además, el éxito de la gestión de la cadena de suministro requiere integrar los procesos con los miembros clave de la cadena de suministro, de lo contrario, se producirá el desperdicio de recursos valiosos.

Entre los impactos negativos generados por las actividades que tienen lugar a lo largo de la cadena de suministro, destaca la emisión de gases de efecto invernadero y la producción de residuos.

Desde las administraciones públicas se ha impulsado políticas preventivas, como la minimización de los residuos generados, y políticas correctivas, para paliar los daños causados sobre el medio natural.

Entre los motivos por los que la Agència de Residus de Catalunya (2012) recomienda minimizar la producción de residuos se encuentran los siguientes:

- Los residuos generados son productos no vendidos y materias primas no aprovechadas.
- Las inversiones en minimización de residuos se amortizan en meses o pocos años.
- Se reduce el riesgo ambiental, de salud y de accidentes de sus trabajadores.
- La empresa se adapta a los cambios y a las exigencias normativas.
- Se mejora la situación ambiental y legal de la empresa.
- Se mejoran las relaciones con la Administración, clientes, proveedores, vecinos, etc.
- Constituye una ventaja y un elemento diferenciador frente a sus competidores.

Para asegurarse de que se consigue reducir el impacto ambiental mediante la minimización de la producción de residuos, la Unión Europea ha aprobado una serie de normativas, principalmente de carácter ambiental, para fomentar la reducción de residuos generados, entre ellas destacan:

- La Directiva Marco de Residuos (2008/98/CE) sobre residuos (Unión Europea 2008) por la que se establecen medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos, la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y la mejora de la eficacia de dicho uso. En ella se establece una jerarquía de residuos que sirve de orden de prioridades en la legislación y en la política sobre la prevención y gestión de residuos:

- i. Prevención
 - ii. Preparación para la reutilización
 - iii. Reciclado
 - iv. Otro tipo de valorización, por ejemplo, la energética
 - v. Eliminación
- Decisión 2003/33/CE por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos (Unión Europea 2003).
- La Directiva 2017/2102/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre las restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos, cuyo objetivo es reforzar la normativa existente sobre la utilización de sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) para proteger la salud humana y el medio ambiente, fomentando asimismo el final apropiado de la vida útil de los AEE con vistas a optimizar su recuperación.
- La Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) (Unión Europea 2012) por la que se establecen las medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención o reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y mediante la reducción de los impactos globales del uso de los recursos y la mejora de la eficacia de dicho uso, de conformidad con los artículos 1 y 4 de la Directiva 2008/98/CE, contribuyendo así al desarrollo sostenible.

Además, en 2011 la Dirección General de Medio Ambiente de la Comisión Europea llevó a cabo un estudio para dar ejemplos de buenas prácticas en materia de permisos e inspecciones de determinadas disposiciones legislativas sobre residuos y preparando, sobre esta base, un conjunto de recomendaciones y documentos de orientación basándose en la legislación anteriormente mencionada.

También se creó una lista de verificación con el objetivo de dar a los inspectores y a las autoridades concesionarias de permisos, indicaciones sobre qué verificar al inspeccionar las instalaciones de desechos y qué condiciones incluir en un permiso. El propósito de la lista de verificación es incluir los aspectos más importantes en aspectos como los requisitos técnicos de la instalación, la aceptación, manejo y almacenamiento de residuos, aspectos operacionales y emisiones al medio ambiente.

La Dirección General de Medio Ambiente ha tenido en cuenta las distintas áreas que conforman la cadena de suministro para crear esta lista de verificación, donde se incluye la logística inversa como operación a llevar a cabo en las estaciones de recogida y transferencia de residuos. (Comisión Europea 2016)

Ahora bien, ¿qué es la logística inversa?

De acuerdo con el Consejo Ejecutivo de Logística Inversa Americano, la logística inversa es el proceso de planificar, implementar y controlar el flujo eficiente y rentable de materias primas,

el inventario durante el proceso, los bienes terminados e información relacionada desde el punto de consumo hasta el punto de origen, con el propósito de recuperar el valor o de proceder a su eliminación de manera adecuada. (Govindan, Soleimani y Kannan 2015)

Los principios de la gestión de la cadena de suministro tradicional también se pueden aplicar a la logística de los flujos de producto recuperado, conocida como logística inversa o gestión de la cadena de suministro inversa.

La logística inversa está ganando importancia a medida que cambian las políticas y legislación de los gobiernos. Especialmente en Europa, los productores se han visto obligados a recuperar, reciclar y finalmente, si el reciclaje no es posible, enviar de manera correcta a vertedero los productos provenientes de los consumidores. (Schultmann, Engels y Rentz 2003).

A la hora de fabricar un producto, se debe tener en cuenta todo su ciclo de vida, de manera que se puedan identificar las áreas que producen un mayor impacto ambiental, para poder tomar las medidas necesarias para reducir el impacto generado sobre el medio ambiente.

Cuando un producto llega a su fin de vida, se convierte en un producto potencial para contaminar el medio ambiente. Sin embargo, estos productos pueden tener partes, componentes o materiales valiosos, que se pueden volver a usar o devolver al ciclo de producción. Es por ello por lo que la recuperación de productos al final de su vida es una etapa importante en el ciclo de vida de los productos (Zarei et al. 2010)

Por tanto, la logística inversa es un segmento especializado de la logística que se centra en el movimiento y gestión de productos y recursos después de su venta y tras su entrega al cliente, e incluye las devoluciones de producto para reparación y/o recuperación del dinero (Vitasek 2013).

En definitiva, La logística inversa es exactamente lo mismo que la logística tradicional, sólo que los flujos de material en lugar de ser de productores a usuarios son de usuarios a productores.

En términos generales, la logística inversa comienza con los usuarios finales, o primeros clientes, donde se recogen los productos usados por los clientes, o productos devueltos, y luego se intenta gestionarlos mediante diferentes decisiones, que van desde el reciclaje, la refabricación y la reparación hasta, finalmente, la eliminación de algunas piezas usadas. (Govindan, Soleimani y Kannan 2015)

La mayor preocupación de la logística inversa es la recogida eficiente, transporte, recuperación, vertido y valor ambiental al mínimo coste.

Se puede concluir, por tanto, que las cadenas de suministro tradicionales, típicas de los sistemas de economía lineal, se basan en la utilización de los recursos de forma ilimitada sin contemplar las consecuencias medioambientales. Ha sido la metodología empleada para el desarrollo industrial y económico, generando nuestro actual modelo de crecimiento. Sin embargo, este modelo no es sostenible, ya que para crecer se están comprometiendo a las generaciones futuras y agotando recursos no renovables. Las apariciones de estos problemas han hecho que surja la necesidad de reutilizar tanto las materias como la energía mediante una economía circular.

Una economía circular, que es la que se lleva a cabo en las cadenas de suministro de lazo cerrado, es aquella que tiene propósito de restauración y regeneración, y que trata de que los productos, componentes y materias mantengan su utilidad y valor máximos en todo momento. Este nuevo modelo económico trata, en definitiva, de desvincular el desarrollo económico global del consumo de recursos finitos.

La economía circular aborda los crecientes desafíos relacionados con los recursos a los que se enfrentan las empresas y las economías, y puede generar crecimiento, crear empleo y reducir los efectos medioambientales negativos, incluidos las emisiones de carbono.

Los desarrollos tecnológicos y cambios sociales actuales crean un marco favorable para hacer posible la transición de la economía lineal hacia una economía circular.

La aparición a nivel internacional de legislación referente a la protección ambiental, así como la creciente importancia que ha tomado la recuperación de producto una vez finalizada su vida útil, ha propiciado que la cadena de suministro tradicional se haya reconvertido, en muchos casos, en una cadena de suministro de lazo cerrado, es decir aquella que no termina en la entrega de los productos terminados al usuario final, sino que considera la recuperación de materiales, minimizando el impacto ambiental mediante la reutilización de materiales, la reducción del uso de energía y la reducción de la necesidad de utilizar vertederos de productos industriales (Guide et al. 2006).

Las cadenas de suministro de lazo cerrado se centran en recoger los productos de los clientes o usuarios y recuperar su valor mediante la reutilización del producto completo y/o alguno de sus módulos, componentes y partes.

De esta manera, se define la gestión de la cadena de suministro de lazo cerrado como el diseño, control y operación de un sistema para maximizar la creación de valor a lo largo del ciclo de vida del producto con una recuperación de valor a partir de diferentes tipos y volúmenes de devoluciones a lo largo del tiempo (Guide y Van Wassenhove 2009)

La necesidad de crear sistemas industriales de lazo cerrado nace del conocimiento de que los recursos naturales son limitados, y de que cualquier ecosistema cerrado, como es La Tierra, puede albergar únicamente una cantidad de residuos finita. (Guide et al. 2006).

De acuerdo con Guide et al. (2000), las características de un sistema de lazo cerrado son:

- La incertidumbre. Refleja la naturaleza incierta de la vida de un producto. Una serie de factores, como la etapa del ciclo de vida de un producto y la tasa de innovación tecnológica, influyen en las tasas de devoluciones. Esta característica tiene un impacto importante en la gestión de la demanda y el control de la gestión del inventario, condicionando el desarrollo y el funcionamiento de estos sistemas. De acuerdo con Bañeguil y Rubio (2005), se pueden distinguir cuatro tipos de incertidumbres:
 - Incertidumbre cuantitativa, relacionada con la cantidad de producto fuera de uso
 - Incertidumbre cualitativa, relacionada con la calidad de los productos fuera de uso

- Incertidumbre temporal, relacionada con el momento de la recuperación del producto
 - Incertidumbre espacial o de localización, relacionada con el lugar en el que se realiza la recuperación del producto.
- Necesidad de equilibrar la demanda con el producto recuperado. También depende de la vida esperada del producto y la tasa de innovación tecnológica. Las organizaciones pueden no controlar directamente las existencias reparables. Una mala correlación entre la oferta de retornos y su demanda pueden llevar a excesos o falta de productos en stock, lo que hace que la gestión de inventarios y de las compras sean complejas y difíciles de planificar, gestionar y controlar.
- La necesidad de desmontar los productos recuperados. Requiere que las empresas conozcan el grado y el método de desensamblaje del producto de antemano. Las diferentes opciones de recuperación del producto requieren diferentes grados de desensamblaje, así las operaciones de reparación solo requieren un desmontaje limitado, para poder extraer y reemplazar las partes no funcionales y, sin embargo, la refabricación requiere un desmontaje completo. Las operaciones de desensamblaje influyen en una serie de áreas de decisión, entre las que se incluyen la planificación y control de la producción, los sistemas de información y el control del inventario.
- La incertidumbre del material que se puede recuperar del producto. Dos artículos idénticos que se han devuelto pueden producir diferentes conjuntos de piezas reparables o refabricables. Esta incertidumbre afecta a la planificación y el control del inventario, la planificación de los recursos y las compras.
- La necesidad de una red de logística inversa. Esto hace referencia a cómo los productos son recogidos desde el usuario final y devueltos a la instalación para ser reprocesados. Es un requisito complejo, y requiere decisiones respecto al número y ubicación de los centros de devolución, los incentivos para las devoluciones de productos, los métodos de transporte y los proveedores externos.
- El problema de las restricciones de coincidencia de materiales. La necesidad de unir partes es motivo de preocupación en las operaciones de reparación y refabricación, ya que los clientes que entregan una unidad para reparar o refabricar pueden querer recuperar la misma unidad. Esta característica requiere mejores sistemas de información y complica la programación de recursos.
- Los problemas de las rutas estocásticas de materiales para operaciones de reparación y manufactura, así como la alta variabilidad de los tiempos de proceso. Se trata de una preocupación a nivel operacional. Las rutas estocásticas reflejan la condición incierta de las unidades devueltas. Los tiempos de procesamiento altamente variables también son una función de la condición de la unidad que se devuelve. Estas incertidumbres hacen que la planificación y el control de la producción, así como el control de los inventarios sean más difíciles en este entorno que en entornos de fabricación tradicionales.

Las cadenas de suministro de lazo cerrado difieren de las cadenas de suministro tradicionales en muchos aspectos. Como ya se mencionó, en las cadenas de suministro tradicionales, el usuario final es el último actor de la cadena de suministro, sin embargo, en las cadenas de suministro de lazo cerrado se incluyen el procesamiento del producto recuperado, en el que el fabricante intenta capturar valor a la vez que integra todas las actividades de la cadena de suministro.

Por tanto, las cadenas de suministro de lazo cerrado incluyen actividades de la cadena de suministro tradicional además de sus propias actividades características. Estas actividades adicionales son (Guide, Harrison y Van Wassenhove 2003):

- La adquisición de los productos provenientes de los usuarios finales
- Actividades de logística inversa para poder trasladar los productos desde su punto de uso hasta los centros de recuperación
- Actividades de prueba, clasificación y disposición, para así poder determinar en qué condición se encuentra el producto y poder realizar con él la operación de reutilización económicamente más atractiva.
- Restauración del producto, para permitir las opciones económicamente más atractivas: reutilización directa, reparación, refabricación, reciclaje o eliminación
- ComercIALIZACIÓN de los productos, creando y explotando mercados para productos restaurados y su distribución.

De acuerdo con Fleischmann (2001), en lo que respecta al diseño, los principales aspectos que distinguen el diseño de las redes de logística inversa con las redes tradicionales de distribución, son:

- La centralización de las operaciones de inspección y separación. La localización de las operaciones de inspección y separación tiene importantes consecuencias en los flujos de producto en las cadenas de suministro de lazo cerrado. La importancia de estas fases es que, el destino del producto sólo se puede asignar después de esta fase, mientras que, en un sistema de distribución tradicional, las rutas de los productos se conocen de antemano.
- La incertidumbre y la falta de control del suministro.

Además del diseño, existen otras diferencias en las distintas actividades que conforman la cadena de suministro entre los entornos de fabricación recuperables y los entornos de fabricación tradicional. Las principales diferencias entre la cadena de suministro tradicional y la de lazo cerrado, según Guide et al. (2000), se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Diferencias entre la cadena de suministro tradicional y la cadena de suministro de lazo cerrado. (Guide et al. 2000)

| Factores | Entorno de fabricación recuperable | Entorno de fabricación tradicional |
|--|---|---|
| Foco ambiental | Busca prevenir la generación de residuos de postproducción | Diseño y fabricación ambientalmente consciente, que se centra en la preproducción. Medidas de prevención y remediación de la contaminación |
| Logística | Flujos directos e inversos Incertidumbre en el tiempo y la cantidad de devoluciones Flujos impulsados por la oferta | Flujo abierto directo No hay devoluciones Flujos impulsados por la demanda |
| Planificación de la producción y control | Necesidad de equilibrar la demanda con las devoluciones Incertidumbre sobre la cantidad de material recuperado Rutas y tiempos de proceso estocásticos Los sistemas de fabricación tienen tres componentes principales: desmontaje, refabricación y reensamblaje | No hay necesidad de equilibrar la demanda con las devoluciones Certeza en los materiales planificados Rutas fijas y tiempos de proceso más estables Los sistemas de fabricación tienen dos componentes principales: fabricación y ensamblaje |

| Factores | Entorno de fabricación recuperable | Entorno de fabricación tradicional |
|---|--|---|
| Previsión | <p>Prever tanto la disponibilidad de producto recuperado y la demanda del producto final</p> <p>Debe prever los requisitos de las distintas piezas del producto ya que las tasas de recuperación de producto son inciertas</p> | <p>Sólo necesita prever el producto final</p> <p>No hace falta prever las piezas</p> |
| Compras | <p>Requisitos de material altamente incierto debido a las tasas variables de recuperación</p> <p>Piezas y componentes, piezas de repuesto, componentes</p> | <p>Los requisitos de material son determinísticos</p> <p>Materias primas, piezas nuevas y componentes</p> |
| Control del inventario y gestión | <p>Tipos: producto recuperado, piezas refabricadas, piezas nuevas, piezas nuevas y refabricadas de sustitución, equipo original, piezas de fabricación</p> <p>Debe rastrear y proporcionar contabilidad para todos los tipos de piezas</p> | <p>Tipos: materias primas, trabajo en proceso y bienes terminados</p> <p>Debe rastrear y proporcionar contabilidad para el trabajo en proceso y los bienes terminados</p> |

3.1. Motivos para aplicar la logística inversa en una cadena de suministro

De acuerdo con Janez Potočnik (2014), comisario de medio ambiente de la Unión Europea en el año 2014, es esencial para la futura competitividad industrial de las empresas en la Unión Europea, no sólo producir productos utilizando menos materias primas, energía y agua, sino también reemplazar los materiales vírgenes e importaciones con suministros de materias primas secundarias cuando estas estén disponibles a la vez que se producen productos que sean fácilmente reutilizables, reparables, renovables y reciclables, de manera que los 600 millones

de toneladas de materiales contenidos en los residuos puedan ser devueltos a un uso productivo en la economía.

De esta manera, la política de gestión de residuos en Europa se está convirtiendo en una política de “pérdida cero”, en la que, a pesar de haber avanzado mucho en la última década hacia el aumento del reciclaje y la reducción del vertido, se debe contemplar el residuo como una fase en un ciclo.

A medida que los materiales se vuelven mas valiosos, también lo hacen los residuos, lo que significa que el principal impulsor para las futuras mejoras en el reciclaje será la demanda de materias primas secundarias.

Sin embargo, es necesario intervenir para que las empresas reutilicen sus desperdicios, ya que los sistemas se encuentran diseñados para el modelo lineal, y los incentivos y las infraestructuras no existen en los lugares correctos, por lo que se está llevando a cabo una revisión de las directivas de residuos, de manera que se analicen todas las etapas del ciclo de producción y de consumo, identificando los fallos de mercado y los cuellos de botella y estableciendo las condiciones para crear el marco correcto para la transición.

Además, los sistemas de recuperación de producto ofrecen a las distintas empresas ventajas, como puede ser el aumento de la rentabilidad gracias a la reducción de la cantidad de materias primas de origen natural necesarias para la fabricación del producto final y una mejora de la cuota de mercado basada en la imagen ambiental (Guide et al. 2006).

Por tanto, de acuerdo con de Brito y Dekker (2004) y con Ortega Mier (2003), los fabricantes llevan a cabo la logística inversa principalmente por los siguientes motivos:

- **Motivos económicos.** La logística inversa puede acarrear ganancias económicas a la empresa por reducir el uso de materias primas, añadir valor con la recuperación del producto y disminuir los costes de vertido.
La recuperación de productos o materiales suponen una fuente de materia prima barata, con un coste inferior a la fabricación de productos nuevos o la compra de materias primas nuevas. En función del valor de los productos recuperados, será más conveniente para la empresa realizar una operación de reprocesado u otra. (Ortega Mier 2003).
- **Marketing.** La implantación de la logística inversa en una empresa contribuye a mejorar su imagen y su posición en el mercado, ya que la recuperación de productos contribuye a la imagen ambiental de la empresa, lo que puede suponer una diferenciación de la empresa en cuestión con la competencia. Sin embargo, no se pueden justificar la implantación de la logística inversa en una empresa únicamente por motivos relacionados con el marketing.
- **Protección de activos.** Aunque no haya beneficios económicos directos, una empresa se puede ver atraída por la logística inversa por motivos estratégicos. El que sea la propia empresa la encargada de la refabricación o reciclaje de los productos utilizados puede servir para proteger las tecnologías empleadas durante la fabricación de las empresas

competidoras, evitando la fuga de productos y componentes importantes a mercados secundarios o empresas competidoras. (Sas et al. 2015)

- **Motivos legales.** Esto hace referencia a cualquier normativa que establezca que una empresa debe recuperar sus productos. Estos motivos son cada vez más importantes, por ejemplo, en Europa, hay un aumento continuado de las políticas ambientales, y disposiciones entre las que se incluye el papel de la logística inversa como herramienta de reducción del impacto negativo generado sobre el medio ambiente. Además, en general las políticas ambientales señalan que el fabricante del producto es el responsable de reducir los productos generados una vez han sido usados.
- **Motivos sociales.** La Responsabilidad Social Corporativa (RSC) hace referencia a un conjunto de valores o principios que impulsan a una empresa o una organización a comprometerse con la logística inversa. Hoy en día, muchas empresas tienen programas extensivos sobre la responsabilidad social corporativa, donde los asuntos sociales y ambientales son prioritarios.

Los motivos que generan flujos inversos influyen en la gestión de las correspondientes actividades logísticas. Por ejemplo, si el principal motivo de aplicación de la logística inversa es el económico, la empresa se verá más motivada a recoger los productos al final de su vida útil, consiguiendo así una situación de demanda *pull*. Lo contrario ocurriría en el caso de que las principales motivaciones de la empresa para aplicar la logística inversa fueran comerciales, legales o de protección de activos, ya que llevarían a situaciones de oferta *push* que hacen que las empresas tengan que responder al comportamiento de los clientes. (Ortega Mier 2003).

Estos motivos no son mutuamente excluyentes, y a veces es difícil establecer el límite entre ellos. En muchos países, los clientes tienen derecho a devolver los productos comprados a través de vendedores distantes, como empresas de correos o minoristas electrónicos. Por tanto, estas empresas están obligadas a darle al cliente la posibilidad de devolver la mercancía, a la vez que esta oportunidad se percibe como una forma de atraer clientes, dando beneficios potenciales a la empresa (de Brito y Dekker 2004).

3.2. Actividades propias de la cadena de suministro de lazo cerrado

La cadena de suministro de lazo cerrado, además de las actividades propias de las cadenas de suministro tradicionales (suministro, producción, distribución y uso), incluyen sus propias actividades características.

Según Fleischmann, Krikke, Dekker, Douwe, & Flapper, (2000), la mayoría de las redes de logística inversa tienen la siguiente estructura:

1. **Recogida.** Se refiere a todas las actividades que recogen los productos usados disponibles y los traslada a algún lugar donde se les realizará un tratamiento adicional. Supone una parte importante del coste total de una cadena de suministro de lazo cerrado. La fase de recogida puede incluir actividades de compra, transporte y almacenamiento, donde el transporte es un factor crucial en el rendimiento ambiental final de la cadena de suministro de lazo cerrado. (Fleischmann 2001).
2. **Inspección y separación.** Incluye todas las actividades que determinan si un producto es o no reutilizable. Por ello, esta fase supone la división del flujo de productos reutilizados en función de las distintas opciones de reutilización. Las actividades de inspección y separación abarcan, entre otras, las fases de desensamblaje, realización de pruebas, clasificación y almacenamiento. La ubicación de estas operaciones en la red tiene un impacto importante en los flujos de bienes resultantes, ya que sólo después de esta etapa, los productos pueden asignarse a una operación de recuperación adecuada y, por tanto, a un destino geográfico. Inspeccionar los productos recogidos pronto puede minimizar la distancia de transporte total, ya que los productos pueden mandarse directamente a la operación de recuperación que le corresponda, evitando el transporte innecesario de elementos como los desechos no recuperables. Debe existir, por tanto, una compensación entre la recogida y la fase de inspección y separación, ya que transferir parte de la recogida al cliente puede ayudar a reducir los costes de transporte, pero puede ser difícil mantener distintos productos separados, lo que aumentaría los costes de inspección y separación. (Fleischmann 2001).
3. **Reelaboración.** Es la transformación real de un producto utilizado en un producto nuevamente utilizable. Esta transformación puede ser de distintos tipos, como puede ser el reciclaje, reparación y refabricación. Además, esta actividad también conlleva las actividades de limpieza, sustitución y reensamblaje. La fase de reelaboración normalmente requiere la mayor inversión de la red de logística inversa. El coste de los equipos específicos de refabricación o reciclaje influye en gran medida en la viabilidad económica de toda la cadena de suministro. (Fleischmann 2001).
4. **Vertido.** Esta actividad se lleva a cabo en productos que no pueden ser reutilizados, ya sea por razones técnicas o económicas. Incluye las actividades de transporte, incineración y disposición en vertedero.
5. **Redistribución.** Hace referencia al envío de productos reutilizables a un mercado potencial y su traslado a los usuarios futuros. Abarca actividades de venta, transporte y almacenamiento.

En la Figura 3 se muestra la estructura general de una cadena de suministro de lazo cerrado, incluyendo las actividades propias de la cadena de suministro tradicional (en azul oscuro), así como las propias de la logística inversa (en naranja).

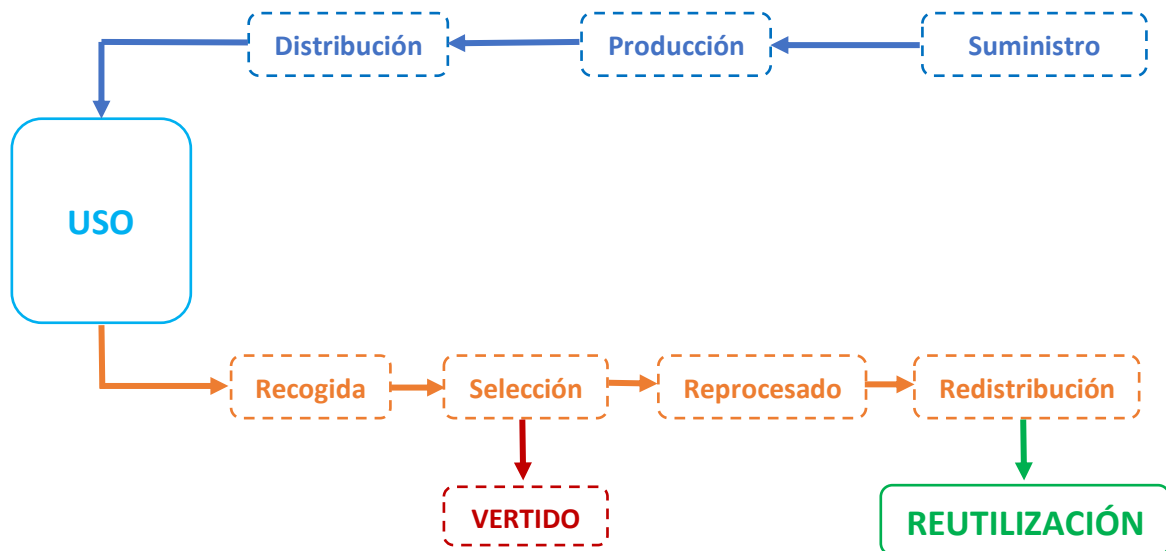


Figura 3. Estructura general de una cadena de suministro de lazo cerrado. (Fleischmann et al. 2000)

3.3. Tipos de retorno

En términos generales, los productos se devuelven principalmente porque no funcionan correctamente o porque ya no cumplen su propósito. De acuerdo con de Brito y Dekker (2004), se pueden distinguir los siguientes tipos de retorno en función del punto de la cadena de suministro en que estos se generen:

- Devoluciones de producción. Aquellos casos en los que los componentes o los productos se recuperan en la fase de producción. Este tipo de retorno se puede deber a distintos motivos, como son excedentes de materias primas, fallos en los controles de calidad en los productos intermedios y finales, por lo que deben ser modificados y por último los restos de producción.
- Devoluciones de distribución. Los productos finales son devueltos durante la fase de distribución. Puede deberse a distintos motivos:
 - Retiradas de producto debidos a defectos que pueden afectar a la seguridad o interferir con el correcto uso del producto. Estos productos normalmente se recuperan a partir de una campaña de recuperación llevada a cabo por el productor y/o el distribuidor.
 - Devoluciones comerciales entre empresas. Son devoluciones en las que un minorista devuelve el producto en cuestión al productor, por un motivo contractual, como puede ser envíos erróneos o de producto dañado, productos con un ciclo de vida corto y productos que no se han vendido.
 - Ajustes de stock
 - Retornos operacionales. Estas devoluciones conciernen a todos los productos cuyas funciones inherentes los hacen volver una y otra vez a la cadena.

- Devoluciones del cliente. Éstas pueden ser productos bajo garantía, productos que necesitan repararse, productos que han alcanzado el final del periodo de uso y productos que se encuentran en el final de su ciclo de vida.

De acuerdo con Ortega Mier (2003), teniendo en cuenta los productos que forman los flujos inversos, se puede realizar la siguiente clasificación:

- Productos al final de su vida útil. Son productos que generalmente se originan en los consumidores. Las razones que motivan a los productores a tratar estos productos son:
 - El valor que sigue teniendo el producto incita a la empresa a realizar operaciones de reutilización, reprocesado o reciclado.
 - Una parte de los productos al final de la vida útil se recuperan por regulaciones ambientales, ya que generalmente es el fabricante es el responsable de la gestión de estos productos.
 - La protección de activos. Uno de los motivos de recuperación de estos productos puede ser evitar que los competidores de los fabricantes del producto original puedan hacer uso del producto fuera de uso, y así evitar que se aprovechen de su tecnología o imagen de marca.
- Residuos generados durante la vida útil. No se trata de residuos que comprenden el producto en su conjunto, sino que representan una parte de este. En algunas ocasiones, las cantidades de material obtenidas a lo largo de la vida útil del producto es mucho mayor que la cantidad de ese material obtenido al final de su vida útil. Por ejemplo, cantidad de aceite usado en la vida útil de un vehículo es mayor que la cantidad de aceite que tiene el vehículo el día que se da de baja.
- Devoluciones comerciales. El comprador devuelve productos al vendedor original a cambio que se le devuelva lo que le costó. Esta transacción puede ocurrir entre dos actores cualesquiera a lo largo de la cadena de suministro, aunque lo más común es que ocurra entre minoristas y fabricantes, y entre consumidores y minoristas.
Existen varias opciones de valorización de las devoluciones comerciales:
 - Si están sin usarse y sin defectos, pueden ser reutilizados vendiéndose directamente a consumidores en mercados alternativos.
 - En caso contrario, pueden ser reciclados, o llevados a vertedero.
- Devoluciones por garantía. Se trata de productos que han fallado durante su utilización o que se han estropeado durante el envío. Este tipo de devoluciones son un servicio al cliente y se encuentran acorde con la legislación vigente. Normalmente estos productos se tratan mediante reparación, y en los casos en los que esta no sea posible, se depositan de manera controlada tras haber sido reemplazados.
- Desechos de producción y productos secundarios. Son los desechos producidos durante el proceso de fabricación que pueden volverse a introducir en dicho proceso y aquellos productos secundarios que pueden ser introducidos en cadenas de suministro alternativas.

- Embalajes y envases. La recuperación de estos productos es muy atractiva económicamente ya que suelen ser reutilizados directamente sin necesidad de reprocesado.

3.4. Gestión de los residuos producidos

Se entiende por residuo industrial todo aquel material sólido, gaseoso o líquido resultante de un proceso de fabricación, transformación, utilización, consumo y limpieza.

El responsable de la gestión de estos residuos es el productor, que es responsable de (Álvarez del Castillo 2017):

- Gestionar los residuos de acuerdo con lo establecido en el catálogo europeo de residuos (CER)
- Formalizar correctamente la documentación de control
- Designar un responsable de residuos, que se encargará de las actividades de:
 - Interlocución con la agencia de residuos correspondiente
 - Vigilar el cumplimiento de la legislación aplicable a la gestión de residuos
 - Promover la adopción de tecnologías limpias (minimización y valorización)

Además, se debe llevar un registro de los residuos donde se especifique:

- El origen del residuo, es decir dónde se ha generado.
- El código del residuo según el CER
- Descripción del residuo generado
- Gestión
- Fecha de salida del residuo
- Entidad receptora (gestor autorizado). Este gestor, a su vez debe llevar una documentación de control que incluye:
 - Declaración anual de residuos
 - Ficha de aceptación
 - Hoja de seguimiento
 - Hoja de seguimiento itinerante
 - Justificante de recepción de residuos
 - Ficha de destino
 - Hoja de seguimiento de aplicación agrícola, si procede
 - Declaración anual de envases.
- Números de la documentación de control
- Código del transportista

Antes de llevar un residuo a vertedero pueden ser necesarias operaciones de tratamiento, como son la estabilización o la solidificación. Estas operaciones se realizan a los residuos sólidos

especiales que no cumplen con la normativa de lixiviación para ser aceptados en un vertedero de residuos industriales especiales.

Una vez el residuo se lleva a vertedero, se debe tener en cuenta si estos son admisibles o no admisibles, de acuerdo con lo que se establece en la orden AAA/661/2013 por la que se modifican los anexos I, II y III del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante el depósito en vertedero (Ministerio de Agricultura 2013).

En lo que respecta a las operaciones de incineración, se realizarán siempre que los materiales sean incinerables y no supongan un elevado coste de operación, ya que permiten destruir los componentes peligrosos de los residuos y reducir el residuo en volumen y peso, siempre cumpliendo con las condiciones establecidas en el Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación (Ministerio de Medio Ambiente 2002).

3.5. Actores implicados

Los flujos de logística inversa pueden volver a la cadena de suministro donde fueron generados o a otras cadenas distintas a la original. La configuración de los actores involucrados implica importantes restricciones en la integración de los flujos directos y los inversos. (Ortega Mier 2008)

De acuerdo con Bañeguil y Rubio (2005), los sistemas de logística inversa se pueden clasificar en función de quién los desarrolla y los gestiona, de manera que se pueden diferenciar los sistemas propios de logística inversa y los sistemas ajenos de logística inversa.

3.5.1. Sistemas propios de Logística Inversa.

La empresa fabricante es la encargada de realizar las actividades de diseño, gestión y control de la recuperación y reutilización de productos fuera de uso.

Las organizaciones que utilizan estos sistemas suelen ser líderes de mercado y fabricantes de productos complejos y tecnológicamente avanzados.

En estos sistemas es posible que terceras partes participen en las actividades que conforman la logística inversa, por ejemplo, la recogida y transporte de los productos, a pesar de que la empresa fabricante es la responsable última de la logística inversa.

Estas redes de logística están destinadas a la recuperación del producto y es una red compleja, con múltiples etapas y generalmente descentralizada, donde el producto recuperado se vuelve a introducir en la red de suministro original. Se puede identificar con las redes de refabricación.

3.5.2. Sistemas ajenos de Logística Inversa

La empresa fabricante no gestiona el proceso de recuperación, sino que se encargan empresas ajenas. El fabricante puede decidir entre formar parte de un Sistema Integrado de Gestión (SIG) o contratar los servicios de un operador logístico.

3.5.2.1. Adhesión a un Sistema Integrado de Gestión (SIG)

Un SIG es una organización que se encarga de promover y gestionar la recuperación de los productos utilizados para que puedan ser tratados o eliminados.

Estos sistemas están formados por miembros de la cadena de producción del producto en cuestión, y financian el sistema en función de su participación en el mercado.

En España algunos ejemplos de SIG son ECOEMBES o ECOVIDRIO.

El producto que fabrican estas empresas es homogéneo y poco complejo tecnológicamente y con escaso valor unitario, por lo que se suele usar en redes para el reciclaje, ya que permiten conseguir eficiencias técnicas y económicas

Sus redes de logística son centralizadas, simples, con pocas etapas y en las que el producto obtenido se destina a cadenas de suministro distintas de las originales.

3.5.2.2. Profesionales u operadores logísticos

Los fabricantes originales también pueden contratar a empresas especializadas para realizar las actividades propias de la logística inversa. Esta opción normalmente la escogen las empresas que una vez tienen diseñada e implantada la red logística directa o tradicional, por necesidades operativas o legales se ven obligadas a implantar la logística inversa desde el final de esta cadena ya existente. Por lo general, suelen ser sistemas logísticos simples, con pocos niveles y con una estructura descentralizada.

3.6. Operaciones de reprocesado

Una vez recuperado el producto, se deben realizar una serie de procedimientos para que este producto, o parte de él, pueda reintroducirse en la cadena de suministro.

Una vez han sido recogido los productos estos se deben clasificar y evaluar, para poder así determinar si el producto en cuestión es reutilizable o no. Estas operaciones incluyen el desensamblaje, la realización de pruebas, la clasificación y el almacenamiento. Una rápida inspección de los productos recuperados permite separar los elementos no recuperables, minimizando así los costes de transporte.

De acuerdo con de Brito y Dekker (2004), las operaciones de reprocesado que se realizarán a los productos seleccionados dependerán de:

- La composición. La heterogeneidad del producto juega un papel fundamental, de manera que tanto el número como la forma en que los materiales y componentes se han unido para formar el producto, afectarán a la facilidad con que el producto se pueda reprocesar, condicionando así también el coste de la actividad. El tamaño del producto también afecta al sistema de recuperación de material.
- El deterioro. Sirve para determinar si la funcionalidad restante del producto es suficiente como para seguir haciendo uso de este ya sea en su totalidad o parcialmente. Para determinar el grado de deterioro es necesario tener en cuenta:
 - Deterioro intrínseco. Si el producto se desgasta durante su uso
 - Homogeneidad en el deterioro. Si todas sus partes se desgastan igual
 - Deterioro económico. Si el producto pierde valor rápido
- Las pautas de uso. El uso viene determinado la localización, la intensidad y la duración del uso.

En función de la composición del producto, el deterioro que haya sufrido y sus pautas de uso, será más recomendable, realizar una operación de reprocesado u otra a un producto determinado. Así, de acuerdo con Thierry et al. (1995) y Ortega Mier (2008), de manera general, estas operaciones de reprocesado son :

1. Reutilizar tal cual ha sido devuelto el producto. Esta operación se realiza con aquellos retornos que cumplen los requisitos de calidad y seguridad exigidos para que pueda ser nuevamente vendido como producto nuevo. Únicamente son necesarias transformaciones de poca importancia, como la limpieza y mantenimiento del producto. Es el caso de las botellas de vidrio.
2. Restauración. Consta de las actividades de revisión, desmontaje y renovación necesarias para devolver al producto a su utilidad inicial, manteniendo su identidad inicial.
3. Reparación. Su objetivo es volver a hacer funcionar el producto, aunque con posibilidad de disminuir el nivel de calidad.
4. Canibalización. Se crea un producto nuevo a partir de partes útiles de aquellos productos recuperados que están averiados.
5. Reciclaje. El propósito del reciclaje es la reutilización de los materiales y piezas de los productos recuperados sin conservar la forma del producto
6. Valorización energética. Consiste en la combustión controlada, en condiciones óptimas, de los residuos que no se pueden revalorizar de ninguna de las formas anteriormente mencionadas, para reducir su volumen convirtiéndolos en escorias, cenizas y gases, con la mínima producción de contaminantes posible. Con el calor producido, se podrá

generar electricidad. Por tanto, dependerá en gran medida del poder calorífico del residuo en cuestión. (Agència de Residus de Catalunya 2009).

7. Deposición en vertedero. Los productos que no han podido ser sometido a ninguna de las operaciones anteriormente mencionadas, se envían a vertedero teniendo en cuenta la legislación existente respectiva al residuo en cuestión.

Luego, se puede decir que en función del destino final que vaya a tener el producto en cuestión, estas actividades se pueden agrupar en tres grandes grupos:

- Actividades de reprocesado con el objetivo de mantener la identidad inicial del producto. Las actividades que comprenden este grupo son la reutilización, restauración y reparación ya que estas operaciones tratan de realizar acciones correctivas al producto que se ha recuperado.
- Actividades de reprocesado con el objetivo de crear el mismo producto. En este caso, la actividad que conformaría este grupo es la canibalización, en la que se crea el mismo producto que se ha recuperado a partir de piezas de otros.
- Actividades de reprocesado para crear productos distintos al recuperado. Es el caso del reciclaje, por el que el producto recuperado pierde por completo su forma para así poder formar un producto completamente distinto.

4. Diseño de redes de cadena de suministro

En las cadenas de suministro convencionales, el diseño de redes logísticas es reconocido como un asunto estratégico de vital importancia.

El objetivo principal del diseño de la cadena de suministro es evaluar las políticas y programas de una compañía y cumplir los objetivos específicos, para así poder cumplir los objetivos estratégicos a largo plazo. La mayoría de las áreas funcionales dentro de una empresa se ven afectadas por un proyecto de diseño de red.

El diseño de la red determina la eficiencia de la cadena de suministro y la satisfacción del cliente. Por tanto, el diseño eficaz y eficiente de la cadena de suministro puede constituir una ventaja competitiva sostenible para las empresas. En el mercado de hoy en día, la competencia ya no es entre empresas, sino que se trata de una competencia entre diferentes cadenas de suministro. Por lo tanto, el diseño de una cadena de suministro efectiva es de gran importancia para que una empresa sobreviva en el mercado y obtenga ganancias. (Yu y Solvang 2018)

El objetivo de la gestión de la cadena de suministro es administrar los flujos de material, de dinero y de información de los proveedores de materias primas, a través de fabricantes, distribuidores y/o minoristas, hacia los clientes finales para generar beneficios a través del cumplimiento de las demandas de los clientes. El objetivo principal del diseño de la red de la cadena de suministro se centra, por lo tanto, en los beneficios o en los costes. (Mehdi Keshavarz Ghorabae et al. 2017)

Dado que abrir y cerrar una instalación es un proceso costoso y lento, cambiar el diseño de la red es imposible a corto plazo. Debido a que las decisiones tácticas y operativas están condicionadas por las decisiones estratégicas, la configuración de las redes de logística tradicionales se convertirá en una limitación para las decisiones de nivel táctico y operativo (Meepetchdee y Shah 2007)

Análogamente, el diseño de la red logística tiene un impacto fundamental en la rentabilidad de los sistemas de logística inversa. Para maximizar el valor de los productos usados, las empresas necesitan establecer estructuras logísticas que faciliten los flujos de bienes que surgen de una manera óptima. Para ello, es necesario decidir dónde ubicar los diversos procesos de la cadena de suministro inverso y cómo vincularlos en términos de almacenamiento y transporte. En particular, las empresas deben elegir cómo recolectar los productos recuperables de sus antiguos usuarios, dónde inspeccionar los productos recolectados para separar los recursos recuperables de los desechos innecesarios, dónde volver a procesar los productos recolectados para que sean comercializables, y cómo distribuir los productos recuperados a los futuros clientes. (Fleischmann et al. 2004)

En muchos casos, las redes logísticas están diseñadas para actividades de logística avanzada sin considerar el flujo inverso de los productos devueltos y la mayoría de ellas no están equipadas para manejar los productos devueltos en canales inversos (Jayaraman, Guide y Srivastava 1999). Por ello, los procesos de transformación que convierten un artículo devuelto en un producto comercializable deben incluirse en una red logística correspondiente.

La configuración de la red de logística inversa tiene una gran influencia en el rendimiento de la red de logística directa y viceversa, ya que comparten una cantidad de recursos tales como, por ejemplo, la capacidad de transporte y de almacenamiento.

Dado que el diseño de la logística directa e inversa lleva por separado lleva a diseños poco óptimos con respecto a los costos, los niveles de servicio y la capacidad de respuesta, el diseño de las redes de logística directa e inversa debe integrarse (Pishvaei, Farahani y Dullaert 2010).

4.1. Tipos de redes de logística inversa

De acuerdo con Fleischmann (2001), las redes de logística inversa se pueden dividir en cinco clases: redes para la devolución obligatoria de productos, redes de fabricantes de equipos originales para la recuperación del valor, redes dedicadas a la refabricación, redes de reciclaje para la recuperación de material y redes para la reutilización de envases.

Además de estas redes, se han identificado otras relacionadas con las devoluciones comerciales, que se han llamado redes para las devoluciones comerciales y que también se explicarán a continuación.

4.1.1. Redes para la devolución obligatoria de productos

Un grupo importante de redes de logística inversa se establecen en respuesta a legislación ambiental. Es el caso del reciclaje de equipos electrónicos, chatarra de coches, etc.

En todos estos casos, son las empresas fabricantes del producto original las responsables de mantener sus productos que se encuentran al final de su ciclo de vida fuera de las corrientes de residuos.

Dado el bajo valor de estos productos, las empresas se centran en la minimización de costes, por lo que el reciclaje del material suele ser la forma típica de recuperación. Los costes se cargan al consumidor, ya sea de manera directa o a través del precio de los productos nuevos.

Aunque, como se mencionó anteriormente, las empresas fabricantes son responsables legal y financieramente de la recogida del producto y de su recuperación, normalmente estas actividades son subcontratadas a proveedores de servicios logísticos y a empresas especializadas en el reciclaje.

Normalmente, la solución se basa en establecer puntos de recogida en cooperación con las agencias de residuos municipales, donde los consumidores dejan sus productos, de manera que una vez se obtenga el volumen suficiente de productos, se clasifican y se trasladan para poder continuar con su procesamiento.

Este es el caso de las pilas (Schultmann, Engels y Rentz 2003). La legislación europea sobre las pilas ha introducido medidas para mejorar las pilas y para controlar el vertido de pilas y acumuladores gastados. Los estados miembros de la Unión Europea deben prohibir la comercialización de las pilas que tengan más de un cierto contenido en mercurio y deben elaborar programas destinados a reducir el contenido en metales pesados de estos productos.

En el caso de Alemania, los fabricantes e importadores se hacen responsables de la recogida de las pilas, con el objetivo de reducir la carga ambiental causada por estas, instalando un sistema de devolución conjunto para organizar, financiar y garantizar la recogida y el posterior tratamiento de las pilas gastadas. El sistema de recuperación de pilas agotadas incluye las fases de recogida, clasificación y reciclaje.

Para poder recoger las pilas se distribuyen contenedores de plástico en distintos municipios y empresas. La recogida de estos contenedores se realiza una vez el municipio o la empresa comunica que estos están llenos, y los distribuidores los llevan a las plantas de clasificación donde son clasificados por máquinas o personas en función de su composición química, para posteriormente continuar con el proceso de reciclaje.

La clasificación de las pilas en función de su composición química es un proceso crucial, ya que la mayoría de los procesos de reciclaje dependen de que en esta etapa no haya errores. En primer lugar, se lleva a cabo una clasificación previa manual y luego otra automática, que identifica los componentes químicos de las pilas combinando información medida.

Una vez han sido clasificadas, cada tipo de pilas, en función de su composición química y su contenido en mercurio, se transporta a su planta correspondiente de reciclaje o, en su caso, a un punto de vertido controlado.

Para que las pilas se puedan someter a un proceso pirometalúrgico adecuado, el contenido químico de las mismas debe tener la misma composición química, en otras palabras, el proceso requiere fracciones de pilas altamente selectivas ya que las impurezas pueden reducir la calidad del producto reciclado y porque el tratamiento incorrecto de pilas con distinta composición química puede causar problemas ambientales.

4.1.2. Redes de fabricantes de equipos originales para la recuperación del valor.

Otro tipo importante de red de logística inversa son las cadenas de suministro de lazo cerrado gestionadas por fabricantes originales de equipos, con el objetivo de recuperar el valor de los productos usados.

Generalmente estas redes abarcan múltiples tipos de flujos de productos usados, de diferentes fuentes y con diferentes motivaciones, tales como devoluciones por fin de arrendamiento, la entrega de un producto viejo y la compra de uno nuevo, y la devolución como un servicio al cliente. Sin embargo, el objetivo principal en todos estos casos es el mercado empresarial, debido al alto valor de los productos y las relaciones con los clientes, que facilitan la localización del producto a lo largo de su ciclo de vida.

Dada la heterogeneidad de los flujos de productos, las operaciones de inspección y evaluación juegan un papel importante para poder maximizar el valor del producto recuperado. Además, la coordinación en las redes gestionadas por las empresas fabricantes de equipo original es particularmente importante, ya que no solo deben coordinarse los flujos de entrada y salida de productos usados, sino también la fabricación de productos originales y recuperados.

Este es el caso de la compañía Dell (Kumar y Craig 2007). Los ordenadores se devuelven a Dell a través de un proveedor logístico externo. Si se trata de una devolución regular, debe enviarse nuevamente a Dell dentro de un periodo de 21 días, para que pueda volver a entrar en el inventario, enumerarse en el outlet de Dell y ser enviadas a un centro logístico. Una vez que un cliente solicita uno de estos equipos, el proveedor de logística lo envía dentro del número estándar de días.

Un ordenador puede ser devuelto de dos formas a Dell:

- A través del Programa de Recuperación de Activos de Dell, que trabaja para grandes clientes corporativos, institucionales y gubernamentales. El grupo encargado, llega al sitio de trabajo del cliente y retira los ordenadores como parte del contrato que tiene Dell con el cliente.
- A través del Programa de Reciclaje de Dell, para clientes individuales. En él, el cliente debe decidir si quiere reciclar o donar su ordenador; de esta manera Dell envía un kit de embalaje y reciclaje.

A partir de este punto, el ordenador puede tener cuatro destinos posibles:

- La donación
- La reventa del ordenador, que puede ser en el estado en que ha sido devuelto o reemplazando de algunos componentes, siempre que la devolución se haya realizado dentro del plazo de un mes.
- Cumplir con las necesidades del servicio o reemplazar piezas en ordenadores. Si los ordenadores devueltos no van a ninguno de los destinos anteriores, se examinan para valorar la existencia de componentes utilizables. Estos componentes se eliminan del ordenador e ingresan en el inventario de piezas de repuesto.
- Reciclaje y eliminación adecuada. El resto de los componentes que Dell no puede usar son enviados a socios para que se desglosen en materiales básicos o se proceda a su eliminación de acuerdo con las normas ambientales vigentes.

4.1.3. Redes dedicadas a la refabricación

Además de los programas de recuperación de productos administrados por fabricantes de equipos originales, las compañías especializadas en refabricación han existido desde hace mucho tiempo.

Comparando estos tipos de cadenas de circuito cerrado con los sistemas de fabricantes de equipos originales explicados anteriormente, se observa una función mucho más prominente de negociación y corretaje. El negocio se basa fuertemente en las oportunidades, buscando una combinación óptima de oferta y demanda.

El corretaje de las cadenas de refabricación también se refleja en las redes logísticas correspondientes. En lugar de agregar infraestructuras de recolección a una red logística existente, las empresas de refabricación necesitan diseñar una red integral que abarque todo el camino, desde la oferta hasta la demanda. En particular, la ubicación del sitio de refabricación depende de las localizaciones de las fuentes de suministro y de los clientes.

Además, el criterio de decisión dominante es la maximización de ganancias en lugar de la minimización de costos.

Una gestión cuidadosa del suministro es vital para garantizar la disponibilidad de los correctos productos recuperables. La red entrante correspondiente requiere un alto grado de flexibilidad y capacidad de respuesta. Asimismo, las operaciones de prueba y evaluación juegan un papel importante: como los refabricantes, en general, tienen pocos medios para controlar los productos durante la parte inicial del ciclo de vida, el estado de un producto entrante sólo se conoce después de la inspección. Por tanto, la ubicación de esta operación a lo largo de la cadena de suministro es un elemento importante del diseño de la red logística.

El logro de los objetivos establecidos en la Directiva 2008/33/CE relativa a los vehículos al final de su vida útil (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea 2008), requiere el reciclaje o recuperación de una cantidad de masa adicional por vehículo, por lo que a la hora de diseñar una cadena de suministro de lazo cerrado de un vehículo, se debe incluir la recuperación de materiales como los plásticos y el caucho.

Un ejemplo de este tipo de redes es la de los neumáticos procedentes de los vehículos. Los fabricantes de neumáticos son responsables de satisfacer la demanda del mercado original, impulsado por la venta de vehículos nuevos.

Una vez que el neumático completa su vida, es recogido por los minoristas o los sitios de recolección específicos. A partir de ahí, los neumáticos que pueden ser recauchutados se envían a las plantas de recauchutado, mientras que los neumáticos de desecho se distribuyen en varios mercados de chatarra según su demanda.

Los neumáticos rechazados de las instalaciones de recauchutado y el caucho molido producido en el proceso de pulido de neumáticos también se envían al mercado de chatarra. Los neumáticos recauchutados con éxito se venden en el mercados secundarios, mientras que el resto de la demanda está cubierto por neumáticos de nueva fabricación.(Abdul-Kader y Haque 2011)

Lo mismo ocurre con el reciclaje del plástico de los distintos elementos que forman un automóvil. Schultmann, Zumkeller y Rentz (2006) modelaron distintas actividades características de la logística inversa aplicándolas en la industria del automóvil, centrándose en el reciclaje de materiales de plástico.

El vehículo que se encuentra al final de su vida útil se envía a una empresa encargada de desmantelar el vehículo. Una vez allí, antes de comenzar el proceso de recuperación, todos los líquidos del coche deben ser drenados (combustible, refrigerante, aceites, etc.) para eliminar el peligro de derramar sustancias nocivas durante las actividades de desmantelamiento y para evitar la pérdida de valor del producto reciclado.

Aquellas partes cuyo valor en mercados secundarios es elevado son desensambladas primero, normalmente son piezas pertenecientes a automóviles nuevos accidentados o a vehículos de edad media, pero de modelos comunes; sin embargo, no para todos los vehículos es rentable. Tras la recuperación de los componentes y la reventa de los más valiosos, se procede a la recuperación de aquellos componentes que no se volverán a vender pero que merece la pena reciclar, como son el cobre, el planito, PVC, etc.

En el caso de los termoplásticos se envían a empresas especializadas en su recuperación, donde se trituran, se limpian, se extraen los residuos de los termoplásticos y forman compuestos.

4.1.4. Redes de reciclaje para la recuperación de material

Las cadenas de reciclaje de materiales se caracterizan por tener un margen de beneficio bastante bajo, dados los bajos precios de las materias primas, por lo que el número de cadenas de reciclaje exitosas es bastante pequeño.

Otra de las características importantes de este tipo de cadenas es la necesidad de realizar grandes inversiones para poder tener instalaciones y equipos de reciclaje especializados.

Los altos costes de inversión y los bajos márgenes de beneficio hacen que se requieran grandes volúmenes de procesamiento, es decir, son necesarias las economías de escala.

Esto se refleja en la estructura de las redes, que normalmente presentan una forma centralizada que dependen de una instalación de reciclaje a gran escala.

Las operaciones de prueba e inspección no son muy relevantes en este caso y, a veces, se realizan operaciones de preprocesado para mejorar la eficiencia del transporte, ya que operaciones como la trituración de los productos pueden disminuir notablemente el coste en transporte y además los beneficios serán más significativos dadas las largas distancias que implican las redes centralizadas.

Un ejemplo de este tipo de redes es el reciclaje de las alfombras en EEUU y Europa (Sas et al. 2015). En este caso, las alfombras se recogen para cumplir con los requisitos legales y para adelantarse a las posibles leyes que se puedan aprobar en un futuro.

El principal problema asociado al reciclaje de las alfombras es su compleja estructura: dado que se diseñan para durar un largo periodo de tiempo, están formadas por diversas capas hechas de diferentes materiales. Por ello, algunos fabricantes están rediseñando sus alfombras para hacerlas más reciclables, pero dado a su largo periodo de vida, no se obtendrán beneficios hasta diez o más años desde la introducción de la alfombra en el mercado.

Ya que la composición de una alfombra es diferente en función del tipo de fibra y el uso final de la misma, se requieren distintas tecnologías para recuperar materiales útiles de las alfombras utilizadas. Además, la estructura de las alfombras no permite la recuperación de los materiales en su forma original, por lo que se tienen que usar para diferentes aplicaciones, donde la calidad del material es menos importante.

Las opciones de recuperación que reducen el volumen de alfombras en vertederos incluyen su reutilización, su restauración y su reciclaje.

La adquisición de las alfombras usadas se puede hacer directamente a partir del sistema municipal de recogida de basuras, a partir de agrupaciones de minoristas, o en centros especializados. Esta última es la más atractiva ya que, en la primera, las alfombras se mezclan con otros materiales que las mojan y las contaminan, lo que las hace inadecuadas para el reciclaje, y en lo que se refiere a la recogida a partir de agrupaciones minoristas, el principal problema es la falta de espacio de los comerciantes para almacenar las alfombras.

Una vez recogidas las alfombras, se procede a su clasificación, que se puede realizar de manera manual o automática. Aquellas alfombras que no sean reciclables se envían a vertedero o a instalaciones de incineración.

Los pasos de procesamiento realizados en una instalación de reciclaje dependen de las opciones de reciclaje seleccionadas. En la mayoría de los casos, la alfombra se tritura para reducir su tamaño. Si hay interés solamente en el reciclaje de fibras, estas pueden ser arrancadas o rasuradas.

Después de la reducción de tamaño, las alfombras se utilizan en los procesos de reciclaje como la recuperación de caprolactama de la alfombra Nylon 6, la separación mecánica de alfombras en diferentes corrientes de materiales o la fusión de toda la alfombra para producir productos moldeados

La recuperación de alfombras usadas es un proceso que tiene poco beneficio y que requiere una alta inversión en equipos especializado, por ello, para que sea rentable es necesario trabajar con altos volúmenes de producto. Además, la red consta de un pequeño número de niveles y los costes en transporte son una parte significativa de los costes totales.

Una vez recogidas, las alfombras se transportan a los centros de procesado, donde se clasifican y se compactan. Las alfombras que se pueden reciclar se envían a los procesadores, mientras que las otras se envían a vertedero o incineradoras.

Esto mismo ocurre con el reciclaje de residuos de construcción para su conversión en arena (Barros, Dekker y Scholten 1998), que debido a los grandes volúmenes de producción está motivado por la reducción de residuos generados y, por consiguiente, incentivar el reciclaje de estos. Sin embargo, la utilización de la arena es muy limitada, ya que en muchas ocasiones la arena está contaminada (generalmente, el 40% de la arena obtenida es arena limpia, el 40% es arena medio limpia y el 20% restante es arena contaminada) y no se puede reutilizar hasta que su calidad sea verificada.

Así, el proceso de obtención de arena a partir de los residuos de la construcción es sencillo: En el caso en que los materiales de demolición estén constituidos principalmente por piedra, se trasladan directamente a una instalación de trituración; en caso contrario, se envían previamente a una instalación donde se clasifican los distintos materiales que los componen: piedra, metal y madera principalmente. Una vez clasificados, los materiales no reciclables se envían a vertedero o se incineran y los compuestos por piedra se envían a instalaciones trituradoras donde se convierten en arena.

Sin embargo, también existen casos en los que el material que se intenta recuperar tiene un alto valor, como el cobre, un producto de alto valor que no se degrada, por lo que es posible su utilización, reciclaje y reutilización indefinidos sin pérdida de calidad.

Una vez generados los residuos de cobre, estos se deben recoger para volverse a incorporar en el proceso de producción (Sarmentero Regueira 2010). El cobre se puede recoger de distintas formas:

- A través de las redes de puntos limpios o verdes, que se encuentran repartidas en distintos puntos de las ciudades y que son competencia de la administración pública.
- A través de chatarreros, es decir, personas que se encargan de la recuperación del cobre y su venta posterior a los productores de este material. Los chatarreros pueden ser:
 - Recuperadores ambulantes
 - Recuperador mediano
 - Recuperador mayorista

Una vez recogido el cobre, se deben clasificar sus residuos y someterlos a procesos de tratamiento previos para que puedan incorporarse al sistema de producción. Los tipos de chatarra se pueden dividir en cuatro bloques (Sarmentero Regueira 2010):

- Chatarras nuevas: Son los residuos de cobre que poseen pocas impurezas y que no se han desgastado durante su uso. Para su incorporación en el proceso de producción se someten a un proceso de refinado
- Chatarras viejas: Residuos procedentes del final de la vida útil de un producto, pero que no contienen elementos no metálicos, por lo que al incorporarse al proceso de producción directamente se fusionan para enriquecer la mata.
- Chatarras complejas: Dado su alto contenido en impurezas y materiales especiales, tienen un tratamiento especial para conseguir separar los componentes que las forman antes de incorporarse en el proceso de producción.
- Escorias: Se generan en los procesos de fundición, refinado y semielaboración. Se reutilizan en estos mismos procesos.

4.1.5. Redes para la reutilización de envases

Estas redes son las típicas de todos aquellos recipientes o contenedores que pueden ser reutilizados casi instantáneamente. La etapa de reprocesado de estas cadenas de suministro está limitada por las operaciones de limpieza y alguna operación de reparación o sustitución

menor. Por tanto, las operaciones de prueba e inspección se limitan a eliminar los contenedores obsoletos o dañados.

El principal problema de este tipo de redes es asegurar la disponibilidad. Esto afecta a la estrategia de recolección, ya que se deben minimizar las fugas en el sistema debidas a la limitada capacidad de respuesta del cliente, el daño del producto o la adquisición de este por empresas competidoras. Para evitarlo, se han utilizado instrumentos como depósito obligatorio, rebajas, o el cambio directo del antiguo producto por uno nuevo.

Además de la estrategia de recolección, la disponibilidad también afecta al itinerario de los contenedores vacíos: dada la estrecha relación entre los flujos de entrada y salida, las compañías suelen usar la misma estructura de red en ambas direcciones, que además de limitar los costes de transporte, facilita la organización y planificación.

En La Unión Europea se encuentra vigente la Directiva 94/62/CE (Unión Europea 1994), cuyo objetivo es armonizar las medidas nacionales sobre la gestión de envases y residuos de envases para prevenir su impacto sobre el medio ambiente y establece como primera prioridad la reutilización, reciclado y demás formas de valorización de residuos de envases.

Un ejemplo de este caso son las bombonas de oxígeno para uso industrial y médico (Carrasco-Gallego, Ponce-Cueto y Dekker 2009).

Para niveles bajos de consumo, el gas se comprime alrededor de 200 bares y se distribuye en bombonas. Debido a la alta presión a la que está sometido, las bombonas se fabrican en acero o aluminio.

En función del tamaño de los pedidos y de la proximidad geográfica al consumidor, estos serán atendidos por un intermediario o directamente en la planta. Las bombonas vacías se recogen en el mismo momento que se entregan las bombonas llenas.

Cuando las bombonas se devuelven a la planta, se revisan para poder saber si pueden volverse a usar de manera segura. Si las pruebas hidráulicas (cada bombona debe pasar una prueba hidráulica cada dos, cinco o diez años) han expirado, la bombona afectada se lleva a una instalación donde se le realizarán pruebas específicas.

Si la bombona puede ser reutilizada, entra en un circuito automático donde se limpia y se rellena con oxígeno.

En el caso de Heineken (van Dalen, van Nunen y Wilens 2005), debido a las regulaciones danesas y europeas referente a los envases y residuos procedentes de los envases, Heineken se ha comprometido a recuperar un 90% de las botellas. Además, también reutiliza barriles y cajas de cervezas. La reutilización de los envases retornables se realiza de la siguiente manera:

Una vez se vacían las botellas, estas van de los puntos de venta y centros de distribución a las instalaciones de recogida, donde se trasladan a un sitio con cajas vacías y sin botellas. Las botellas y las cajas se limpian y se devuelven a la fabrica para continuar con el proceso de llenado.

4.1.6. Redes para las devoluciones comerciales

Además de todos estos tipos de redes que se han mencionado, se puede añadir otra de devoluciones comerciales, es decir de aquellos productos devueltos por los consumidores por cualquier motivo en un periodo igual o inferior a 90 días desde su fecha de adquisición. (Blackburn et al. 2004).

En estos casos, el ciclo de vida del producto es crucial para el diseño de la cadena de retorno ya que, para productos con pequeños ciclos de vida, o según Blackburn et al. (2004), de alto valor del tiempo marginal (MVT), el diseño de la cadena será descentralizado, lo que permite una diferenciación temprana para así extraer el máximo valor posible del producto, que disminuye rápidamente.

Sin embargo, para productos con grandes ciclos de vida, o con bajo MVT, el diseño de la cadena será centralizado, de manera que las acciones de diferenciación del producto se realizarán tan tarde como sea posible (Souza 2014)

Este es el caso de productos como los ordenadores (Blackburn et al. 2004) en los que los productos recuperados se transportan a un depósito. En primer lugar, tiene lugar la transacción económica: un tercero verifica físicamente el producto devuelto y emite crédito al minorista. A continuación, los productos se clasifican por tipo y modelo, se colocan en pallets, se etiquetan y se envían a centros especializados de pruebas y remodelación.

Una vez en los centros especializados, las unidades procedentes de la emisión de crédito se someten a procesos de restauración, aunque siempre hay algunas unidades que no cumplirán los estándares de calidad establecidos y se eliminarán. Los productos reparados, se utilizan en primer lugar para abastecer el stock de garantía, y las unidades restantes se venden en mercados secundarios.

Dado el bajo valor del MVT, ya que los ordenadores tienen grandes ciclos de vida, esta cadena tiene un diseño centralizado, en el que las acciones de diferenciación del producto se hacen tan tarde como sea posible. En un principio, esta empresa aplicó la logística inversa, no para la recuperación de valor, sino para minimizar los costes de procesar las devoluciones, sin embargo, en los últimos años, se ha decidido a desarrollar una cadena de suministro más receptiva.

5. Metodología del diseño de la cadena de suministro

En el diseño de las redes de logística, la palabra *red* implica que la cadena suministro tiene una estructura más compleja que una cadena, y que los flujos entre entidades son una parte inseparable de la cadena de suministro. La gestión de la cadena de suministro plantea nuevos problemas que requieren sus propios métodos y herramientas.

El diseño de la cadena de suministro es un problema estratégico, cuya solución influye en el rendimiento de la cadena de suministro, y comprende decisiones relativas al número y localización de instalaciones de producción, la capacidad de cada una de ellas, la asignación de un mercado regional a una o mas instalaciones y la selección de los proveedores de subensamblajes, componentes y materiales.

Aunque la mayor parte de la investigación sobre la cadena de suministro se ha centrado en la gestión de una configuración ya existente, la literatura actual en el diseño de las cadenas de suministro principalmente propone modelos de programación matemáticos de gran dificultad, aunque algunos tratan conceptos generales de aproximaciones de diseño.

Dado que el diseño de la cadena de suministro normalmente es un proceso largo y complejo, se recomienda seguir un método y entenderlo como una serie de pasos ordenados con una guía y herramientas para facilitar su implementación

En este caso, se ha decidido seguir el método Supply Chain Outline Process (SCOP) propuesto por Corominas et al. (2015). Este método sigue un enfoque jerárquico top-down, cuyo objetivo es facilitar la evaluación y selección de alternativas a los diseñadores reduciendo la cantidad de alternativas a analizar, así como compartir y entender la información de diseño.

Así, se evita la consideración desde el principio de detalles innecesarios y la toma prematura de decisiones y, además, tienen prioridad las decisiones tomadas sobre las actividades que las tomadas sobre los actores, lo que reduce significativamente el análisis de las alternativas.

No se trata de una estructura escalonada, sino que se puede considerar cualquier tipo de relación entre los actores y considera la logística inversa desde la primera etapa del método, teniendo en cuenta la posibilidad de que exista un retraso significativo entre el comienzo de una actividad y la disponibilidad de sus outputs.

Para llevar a cabo este método, se deben seguir cinco etapas:

- **Etapla 1: Definición del objeto, análisis del entorno y determinación de los objetivos de la cadena de suministro.**

La definición del objeto describe el producto, caracterizando sus mercados potenciales. Esta definición influye en el diseño de la cadena de suministro. En definitiva, la definición del objeto es una descripción de la razón de ser de una cadena, de su misión.

Una vez se ha definido el objeto, se realiza un análisis del entorno, que puede interactuar con la definición de la cadena de suministro.

Los objetivos, en general están subordinados al objeto de la cadena de suministro, y pueden incluir, entre otros, la maximización del valor bursátil de las acciones, los beneficios, la fiabilidad, la solidez y la capacidad de recuperación; minimización del

costo o del tiempo de respuesta; o cubrir un conjunto de mercados tan pronto como sea posible.

En esta etapa, se debe establecer, si es posible, un conjunto de objetivos y sus relaciones, incluyendo el horizonte de planificación.

▪ **Etapa 2: Definición de la macroestructura de la cadena de suministro.**

Se definen grandes bloques como parte de la cadena de suministro y las relaciones entre ellos. El resultado se presenta en un gráfico llamado Gráfico-M.

Estos bloques están formados por todas las actividades que tienen lugar en la cadena de suministro: compras, producción, distribución, usuarios, etc.

Los bloques que se proponen son:

- Bloque P: Lo conforman las actividades de compra, producción y distribución
- Bloque U: Formado por los usuarios
- Bloque D: Hace referencia a los residuos generados por las actividades de compra, producción y distribución, y pueden estar formados por vertederos, plantas de tratamiento de residuos, centros de clasificación para el procesamiento adicional de productos y organizaciones benéficas
- Bloque C: Lo forman los puntos de recogida de productos en fin de vida
- Bloque R: Consiste en las actividades de refabricación y reciclaje
- Bloque S: Representa a los mercados secundarios para los productos reprocesados.

▪ **Etapa 3: Definición de la mesoestructura de la cadena de suministro.**

La mesoestructura de la cadena de suministro corresponde a las relaciones entre las *clases* de elementos contenidos en cada *vértice* del Gráfico-M.

Una *clase* es el conjunto de elementos capaces de ejecutar transformación de entradas en salidas particular, o lo que es lo mismo, una receta. Para definir la mesoestructura es necesario:

- Definir la estructura del producto y el proceso de producción: La definición de la mesoestructura requiere una definición profunda de la estructura del producto (módulos o subensamblajes) y del proceso de producción.
- Establecer las opciones para cada actividad o grupo de actividades de la cadena de suministro. Una vez conocidos el producto y el proceso de producción, se deben elegir las opciones que se consideran con respecto a las fases de compras y la producción, distribución, recogida y reprocesado.
- Especificación de un modo para cada vértice principal de cada transformación de producto.

En cada transformación de entradas y salidas, se puede considerar un vértice principal que contiene información, cuantificada o no, sobre las relaciones entre las entradas y salidas. Estas relaciones corresponden a uno de estos modos:

- Mc (convergencia). Un número de unidades pertenecientes a los elementos de un grupo de componentes genera una unidad de producto final o intermedio
- Mx (mezcla flexible). Muchos productos se obtienen al mezclar diferentes materias primas

- Md (divergencia). Una unidad de entrada genera varias salidas
 - Mm (muchos a muchos). Algunas cantidades de varias entradas generan algunas cantidades de varias salidas.
 - Ms (suma). No hay proceso de transformación. El mismo producto que entra sale.
 - Me (evolución). Una cantidad de una entrada se convierte en una salida de diferente naturaleza o condición.
 - Realizar el gráfico-m. El gráfico m es una herramienta que representa de manera compacta y precisa el grupo de actividades que se realizan en la cadena de suministro y sus relaciones. Cada clase corresponde a un vértice o grupo de vértices conectados con otras clases, siendo las entradas y salidas de la clase en cuestión salidas y entradas de esas clases.
- **Etap 4 Definición de la microestructura de la cadena de suministro.**
- La definición de la microestructura de la cadena de suministro tiene como objetivo determinar las instalaciones donde se desarrollarán las recetas, el volumen de flujos entrantes y entrantes entre las instalaciones y los medios de transporte respectivos. Las herramientas para definir la microestructura son los Gráficos- μ y los modelos matemáticos de programación basados en ellos. Cada Gráfico-m definido en la etapa tres genera un Gráfico- μ que proporciona una configuración de SC particular, con la ayuda de un programa de simulación o programación matemática.
- Lista de instalaciones donde se llevan a cabo las transformaciones
 - Fuentes de demanda
 - Medios de transporte entre instalaciones y fuentes de demanda
 - Gráfico- μ . Se basa en el Gráfico-m. Cada grupo de vértices pertenecientes a una transformación en el Gráfico-m debe ser reemplazado por un conjunto de *racimos*, cuyos elementos se refieren a una instalación existente o potencial donde las recetas se desarrollarán.
- Una vez que se establece una lista de instalaciones, se evalúa cada una con el objetivo de retener solo aquellas que cumplen un conjunto de condiciones predefinidas de manera que la complejidad del proceso de diseño se mantiene dentro de límites razonables.
- Modelo matemático. Para optimizar las decisiones que configuran la cadena de suministro, se puede derivar un modelo de programación matemática del Gráfico- μ . La propia estructura del gráfico y la información asociada facilitan la formulación del modelo.
- **Etap 5: Elección de una configuración de la Cadena de suministro y definición de un protocolo de incidentes.**
- El proceso da como resultado la elección de una configuración de la cadena de suministro, de acuerdo con los criterios establecidos y el proceso adoptado de toma de decisiones.
- El paso final consiste en formular un plan estratégico para tratar con eficacia los incidentes y las interrupciones en la cadena de suministro, incluida una descripción de los medios para detectar estos incidentes y acciones correctivas que se llevarán a cabo.

5.1. Metodología aplicada

Tal y como se mencionó, se ha seguido la metodología SCOP propuesta por Corominas et al. (2015). Sin embargo, a la hora de definir el proceso para cada uno de los casos de estudio analizados, se han tenido en cuenta más aspectos que los mencionados en el artículo de Corominas et al. (2015).

En el modelo propuesto, al definir el bloque R, solamente se hace referencia a actividades de reciclado y de refabricación. También, el bloque D de deposición, no lo conforman únicamente los vertederos, sino que también forman parte de este las plantas de tratamientos de residuos, los centros de clasificación de los productos para tratamientos posteriores y las donaciones a entidades benéficas.

En este trabajo, además de profundizar en las opciones de reprocesado de material, que se han dividido en reutilización, restauración reparación, canibalización y reciclaje; se ha definido el bloque D únicamente como la deposición controlada en vertedero, tal y como se mostrará de manera más extensa en adelante.

Dada la importancia ya mencionada de las operaciones de clasificación y evaluación de los productos que se encuentran al final de su vida útil en la logística inversa, se ha decidido establecer un bloque nuevo dedicado a estas actividades. También, además del bloque de mercados secundarios, se ha añadido un bloque destinado a otras cadenas de suministro, diferenciando así el destino de los productos en función de si la operación de reprocesado que se ha realizado con ellos mantiene la forma inicial del producto, o si este pierde la forma para formar nuevos productos diferentes a los iniciales.

También se ha integrado la logística inversa en la red tradicional, agregando la compra de productos recuperados entre las opciones de compra de materias primas, y en base a lo establecido en varios artículos de investigación, se ha ampliado las opciones de recogida y reprocesado propuestas por Corominas et al. (2015), y se han añadido opciones referentes al bloque de clasificación y evaluación.

De esta manera, el modelo propuesto quedará de la siguiente manera:

ETAPA 1: DEFINICIÓN DEL OBJETO, ANÁLISIS DEL ENTORNO Y DETERMINACIÓN DE LOS OBJETIVOS.

Esta etapa es exactamente igual que la propuesta por Corominas et al. (2015). Se debe definir el objeto que se va a estudiar en profundidad, así como su entorno y determinar los objetivos de la empresa fabricante.

ETAPA 2: DEFINICIÓN DE LA MACROESTRUCTURA DE LA CADENA DE SUMINISTRO.

Tal y como se mencionó anteriormente, teniendo en cuenta los distintos tipos de redes existentes de logística inversa y con el objetivo de hacer el diseño de la cadena de suministro de

lazo cerrado más preciso, se ha decidido ampliar el número de bloques propuestos por Corominas et al. (2015), y profundizar en su definición. De esta manera, se proponen los siguientes bloques:

- Bloque P: Incluye las actividades de compras, producción y distribución
- Bloque U: Representa a los usuarios finales
- Bloque M: Representa a los mercados o clientes
- Bloque C: Representa a los puntos de recogida
- Bloque CE: Hace referencia a las actividades de clasificación y evaluación
- Bloque R: Se refiere a las actividades de reprocesado (reutilización, restauración, reparación, canibalización y reciclaje)
- Bloque S: Representa los mercados secundarios
- Bloque OCS: Representa a otras cadenas de suministro a las que se puede llevar el producto
- Bloque D: Representa el depósito final del producto en vertederos de manera controlada y de acuerdo con lo establecido en la legislación vigente.

ETAPA 3: DEFINICIÓN DE LA MESOESTRUCTURA DE LA CADENA DE SUMINISTRO.

Para poder crear el Gráfico-m, se deben considerar todas las posibles opciones de producción, distribución, recogida, reprocesado y clasificación y evaluación. De esta forma, a las opciones propuestas por Corominas et al. (2015) se han añadido otras, de manera que, a la hora de desarrollar el diseño de la cadena de suministro de lazo cerrado en cada caso de estudio, se tendrán que estudiar las siguientes opciones:

Opciones de compra y producción

En este punto, las opciones están relacionadas sobre todo con las decisiones de hacer o fabricar. Se han tenido en cuenta las opciones propuestas por Corominas et al. (2015) y, además, se tienen en cuenta otras, de manera que las opciones a considerar son:

- P1 Fabricar.
- P2 Comprar a un único proveedor con relación contractual en el tiempo.
- P3 Comprar a varios proveedores sin relación contractual a largo plazo.
- P4 Comprar a uno o más proveedores a lo largo del tiempo.
- P5 Comprar en el mercado.
- P6 Comprar productos reprocesados.

Opciones de distribución

En lo que respecta a las opciones de distribución, se mantienen las opciones definidas por Corominas et al. (2015):

- D1 El almacenamiento lo realiza el fabricante, que realiza envíos directos al cliente.
- D2 El almacenamiento lo realiza el fabricante, con envío directo y fusión en tránsito de los componentes del pedido en instalaciones intermedias.

- D3 El almacenamiento lo realiza el distribuidor y un operador de logística entrega el producto a domicilio.
- D4 El distribuidor almacena el producto y se realiza una entrega a domicilio de última milla.
- D5 El distribuidor o el fabricante almacenan el producto y el cliente lo recoge en el almacén.
- D6 Un minorista almacena el producto y el cliente lo recoge.
- D7 Almacenamiento centralizado con recogida por parte del cliente en un minorista, bajo pedido previo.

Opciones de recogida

Los productos fuera de uso deben ser recogidos antes de ser enviados a los centros de clasificación y evaluación. Esta recolección puede ser realizada por distintos actores, de manera que se puede distinguir entre distintos tipos de recogida:

- R1 Directamente por el fabricante
- R2 Directamente por el refabricante
- R3 A través de una red de distribuidores y minoristas
- R4 A través de proveedores de logística externos
- R5 A través de sistemas integrados de gestión (SIG)
- R6 Los usuarios entregan directamente el producto a los fabricantes
- R7 A través de centros especializados
- R8 Recogida en la acera
- R9 En centros de recogida municipales

Clasificación y evaluación

Los procesos de clasificación y evaluación pueden ser centralizados o descentralizados. Los sistemas centralizados, son recomendables para procesos en los que los procesos de evaluación suponen un alto coste y cuando se tratan de productos de gran volumen tipo mercancía. Este tipo de clasificación permite simplificar la red.

Los sistemas descentralizados, por su parte, son recomendables para procedimientos en los que la fase de evaluación suponga un coste bajo. Este proceso puede ser realizado por proveedores externos y evita el envío de residuos no reprocesables, por lo que se reduce el coste de transporte. (Barker y Zabinsky 2008).

Por tanto, las opciones de la fase de clasificación y evaluación que se estudiarán son:

- CE1 Centralizada
- CE2 Descentralizada

Opciones de reprocesado

Una vez se ha recogido y se ha clasificado el producto en cuestión, se debe realizar alguna de las siguientes operaciones para conseguir recuperar su valor:

- RP1 Reutilización
- RP2 Restauración
- RP3 Reparación
- RP4 Canibalización
- RP5 Reciclaje

Además de seleccionar las opciones que se llevan a cabo en la cadena de suministro, se debe crear el Gráfico-m, teniendo en cuenta los tipos de relaciones entre modos explicados anteriormente.

ETAPA 4 DEFINICIÓN DE LA MICROESTRUCTURA DE LA CADENA DE SUMINISTRO.

Esta etapa es exactamente igual que la propuesta por Corominas et al. (2015), sin embargo, en el caso de las cadenas de suministro de lazo cerrado, se debe de tener una serie de consideraciones en cuenta.

Por ejemplo, la disponibilidad del producto está ligada a una incertidumbre, ya que la cantidad de producto que se decida reprocesar no depende directamente del productor, sino que depende de la predisposición de los usuarios finales hacia el reciclado del producto en fin de vida o fin de uso.

Además de los usuarios, una vez el producto llega a los centros de recogida, se debe clasificar y evaluar, por lo que no se reprocesa el 100% de los productos enviados a estos centros por los usuarios finales, ya que muchos de ellos pueden tener fallos estructurales que los convierten en inutilizables o pueden no cumplir con la normativa de calidad exigida para que estos puedan ser reprocesados, por lo que se procede directamente a su vertido de manera controlada en vertederos.

También los tiempos de reproceso tienen una incertidumbre asociada, ya que en muchos casos, tal y como se explicó en los casos de estudio (Schultmann, Engels y Rentz 2003) la recogida de los productos no se realiza hasta que exista una capacidad mínima de estos en los contenedores de recogida, reduciendo así los costes de transporte. La necesidad de desmontar los productos recuperados también juega un papel importante en los tiempos de reproceso, cuanto

Otro aspecto importante a tener en cuenta a la hora de crear el gráfico-μ, es la ubicación de la instalación. En función del valor del producto que se vaya a reprocesar, los gastos en transporte pueden suponer los principales costes en de la logística inversa, por lo que una instalación de reprocesado situada cerca de los centros de recogida puede suponer una disminución importante de los costes de la cadena de suministro de lazo cerrado.

Además, en el caso de que la operación de reprocesado que se realice sobre el producto sea el reciclaje, es recomendable triturar el material antes de transportarlo, de manera que la cantidad

de producto transportado es mayor, y se reducen los costes en transporte, así como el impacto ambiental proveniente de esta actividad de la cadena de suministro. (Fleischmann 2001).

Asimismo, para optimizar las decisiones que configuran la cadena de suministro, se puede derivar un modelo de programación matemática del Gráfico-μ.

Existen muy pocos modelos de optimización para el diseño de cadenas de suministro con flujos inversos en situaciones de incertidumbre, ya que esta hace que los modelos de programación entera mixta (En inglés Mixed Integer Linear Programming, MILP) sean muy difíciles de resolver (El-Sayed, Afia y El-Kharbotly 2010).

Además, el diseño de redes de logística inversa generalmente conlleva más de un objetivo, por lo que para facilitar la resolución de los MILP siempre se hace una serie de consideraciones, dependiendo del caso de estudio en cuestión.

ETAPA 5: ELECCIÓN DE UNA CONFIGURACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO Y DEFINICIÓN DE UN PROTOCOLO DE INCIDENTES.

Al igual que la etapa 1 y la etapa 4, esta etapa se mantiene tal cual la explican Corominas et al. (2015).

Una vez se ha resuelto el modelo matemático, se obtienen distintas configuraciones posibles de la cadena de suministro en función a los criterios preestablecidos. A partir de estas opciones de configuración se seleccionará la que más se adecúe a las necesidades de la empresa.

Cuando se ha seleccionado la configuración que va a tener la cadena, se debe definir un protocolo de incidentes, que permita afrontar todos los posibles problemas que puedan surgir a lo largo de toda la cadena de suministro, como puede ser la rotura de stock, una mala estimación de los productos recuperados, problemas con los operadores logísticos o con los gestores de residuos, etc.

5.2. Casos de estudio

A continuación, se aplicará la metodología de SCOP a dos casos de estudio, uno basado en la cadena de suministro de las lavadoras, y otro en la cadena de suministro de la cerveza.

Teniendo en cuenta los tipos de redes enunciados en el apartado 4.1, la cadena de suministro de lavadoras correspondería a una red para la devolución obligatoria de productos y la cadena de suministro de la cerveza correspondería a una red para la reutilización de envases.

Sin embargo, en la cadena de suministro de las lavadoras, también se tienen en cuenta las devoluciones comerciales por garantía, por lo que dentro de esta cadena existirán dos tipos de redes, tal y como se verá a continuación.

Se debe tener en cuenta que, en los casos de estudio desarrollados, la información obtenida no es exacta, ya que no se ha podido tratar directamente de las empresas, por lo que no se podrán analizar con exactitud todas las etapas de la metodología propuesta.

En el caso del análisis de la microestructura, es decir la etapa 4, es necesario precisar con exactitud la ubicación, la propiedad, la disponibilidad de los recursos en el tiempo, cuantificar las entradas y salidas de recursos, el tiempo de retraso entre estas entradas y salidas, los costes unitarios, fijos y de apertura y cierre, la capacidad de producción y el consumo de energía y emisiones, con el fin de poder desarrollar el modelo matemático correspondiente para poder así optimizar y hacer más eficiente la cadena de suministro conforme a los objetivos preestablecidos por la empresa. Para poder desarrollar esta etapa de forma correcta, es necesario disponer como mínimo de todos los datos anteriormente mencionados, por lo que esta etapa no se ha podido desarrollar de manera completa, tal y como se muestra en los dos casos de estudios que se presentan a continuación.

La etapa 5, en la que se selecciona de la cadena de suministro y se define un protocolo de incidentes, sólo se podrá desarrollar una vez se haya definido el Gráfico- μ y se haya resuelto el modelo matemático propuesto.

5.2.1. Caso 1: Diseño de la cadena de suministro de lavadoras

Se ha decidido aplicar el método propuesto por Corominas et al. (2015), para una empresa fabricante de lavadoras.

Las lavadoras son grandes electrodomésticos que entran dentro del grupo de aparatos eléctricos y electrónicos. Como se ha mencionado anteriormente, los fabricantes e importadores son los responsables de la gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, tal y como dice el Real Decreto 110/2015 (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente 2015), además de verse obligados a establecer los mecanismos necesarios para que el residuo pueda ser correctamente tratado en las plantas de reciclado.

El mercado español de grandes electrodomésticos cuando se estabilice será de entre 7,5 y 8 millones de unidades al año.

Para poder aplicar el método, se ha escogido a la primera empresa fabricante de electrodomésticos de España, BSH, que, entre otros electrodomésticos, se encarga de la fabricación de lavadoras, en el mercado español y portugués, así como de su exportación a otros países.

La empresa en cuestión tiene una participación en el mercado de valor de entre el 38 y el 40% (BSH Electrodomésticos España S.A. 2017).

Según la Asociación Nacional de Fabricantes en Importadores de Electrodomésticos (ANFEL), en el año 2016 en España se vendieron 1.714.000 lavadoras (ANFEL 2017). Si se supone que la participación en el mercado de la empresa es del 39%, este fabricante vendió en el año 2016 aproximadamente 668.460 lavadoras.

La fabricación de estas lavadoras tiene lugar en Zaragoza, y el centro de fabricación se encuentra a una distancia de aproximadamente 10,5 km del centro logístico (BSH Electrodomésticos España S.A. 2017).

Esta empresa, además de la fabricación, también se encarga de transportar y almacenar los productos fabricados entre las distintas comunidades de España y también en Portugal, mediante el uso de camiones, trenes y barcos.

Además, a pesar de que principalmente se fabrica con el objetivo de suplir la demanda del mercado español y portugués, también exporta algunos de sus productos. Tiene repartidos a lo largo del territorio peninsular y balear, plataformas de cross-docking y en el caso de las Islas Canarias, dispone de almacenes regionales, tal y como se muestra en la Figura 4. (Egido Roldán 2012)

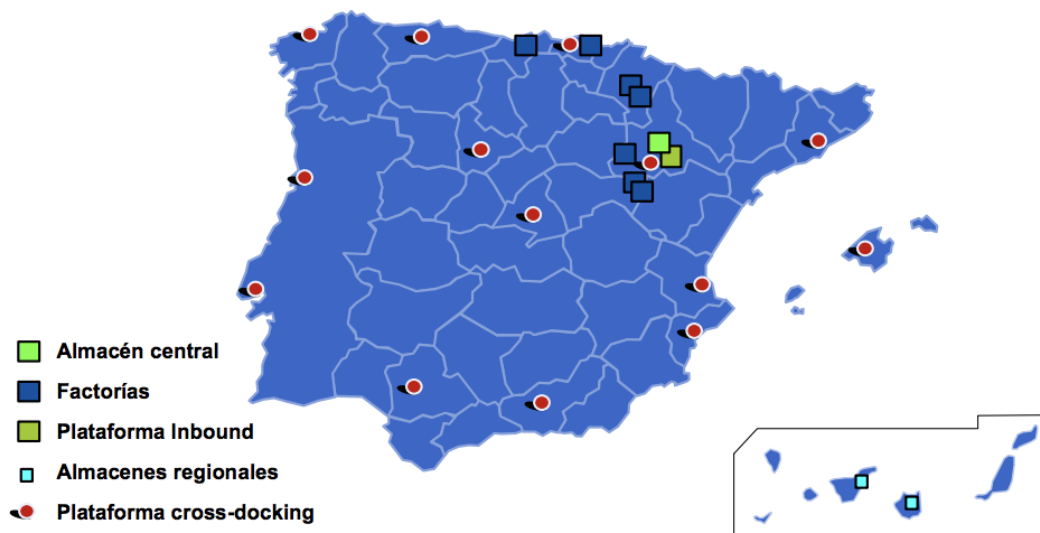


Figura 4. Distribución geográfica de factorías, almacenes y plataformas en España y Portugal (Egido Roldán 2012)

Por tanto, la empresa se encarga de la fabricación y de la distribución, tanto a minoristas como directamente a los usuarios finales a partir de sus canales de venta online.

Una vez el producto se encuentra fuera de uso, y dado que el fabricante es el responsable de la gestión de los residuos, la empresa decide contratar a la Asociación Española de Recuperadores de Economía Social y Solidaria (AERESE), una plataforma estatal de entidades solidarias dedicadas a la reducción, reutilización y reciclaje de residuos. Esta plataforma se encargará de la reparación y venta de aquellas lavadoras que puedan ser reutilizadas y, en caso de que no sea posible la reutilización, se encargará del reciclaje de los distintos materiales que conforman el producto en cuestión.

Partiendo de esta información, se puede proceder a la aplicación de la metodología propuesta.

▪ **Etapas 1: Definición del objeto, análisis del entorno y determinación de los objetivos.**

Objeto: Suministrar lavadoras a los usuarios finales. Dado que se trata de una gran empresa, las lavadoras que fabrica son de distintas marcas, y tendrán por tanto distintas características.

Entorno: Se trata de la empresa líder en el mercado español de electrodomésticos de línea blanca y se espera un crecimiento del mercado español de grandes electrodomésticos en los próximos años.

Objetivos: Entre los objetivos de la empresa se encuentran satisfacer a los clientes, contar con el mejor talento en la organización, ser una empresa de éxito en el nuevo entorno tecnológico y social y colaborar en el entorno y obtener buenos resultados, así como el desarrollo sostenible de la empresa.

▪ **Etapas 2: Definición de la macroestructura de la cadena de suministro.**

En este caso, se tendrán en cuenta los siguientes bloques:

- Bloque P: Incluye las actividades de compras, producción y distribución
- Bloque U: Representa a los usuarios finales
- Bloque M: Representa a los mercados o clientes
- Bloque C: Representa a los puntos de recogida
- Bloque CE: Hace referencia a las actividades de clasificación y evaluación
- Bloque R: Se refiere a las actividades de reprocesado (reutilización, restauración, reparación, canibalización y reciclaje)
- Bloque OCS: Representa a otras cadenas de suministro a las que se puede llevar el producto reciclado
- Bloque S: Representa a los mercados secundarios en los que se pueden vender las lavadoras reparadas.
- Bloque D: Representa el depósito final del producto en vertederos de manera controlada y de acuerdo con lo establecido en la legislación vigente.

De manera, que el Gráfico-M creado, con todos los bloques que se han mencionado, se muestra en la Figura 5.

Una vez el interior de la lavadora esta completamente montado, se une con el mueble de lavadora

Se añaden los tubos, las gomas y el contenedor de agua. Además, se le coloca el contrapeso, así como el fuelle de salida del agua. (Fabricando. Made in Spain. 2013b)

Opciones para cada actividad o grupo de actividades de la cadena de suministro

En primer lugar, se definen las distintas opciones que se contemplarán en el modelo matemático. Estas opciones no son del todo precisas, ya que, por ejemplo, en lo referente a las opciones de compra y producción.

- Opciones de compra y producción

En este punto, las opciones están relacionadas sobre todo con las decisiones de hacer o fabricar. Sin embargo, se debe de tener en cuenta que únicamente se sabe que el fabricante fabrica unos componentes y compra otros, sin explicar qué tipo de relación tienen con los proveedores, por lo que entre las opciones mencionadas en el apartado 3.2.1., las que se van a tener en cuenta son las que se enuncian a continuación:

P1 Fabricar.

P4 Comprar a uno o más proveedores a lo largo del tiempo.

P6 Comprar productos reprocesados.

- Opciones de distribución

En lo que respecta a las opciones de distribución, entre todas las propuestas por Corominas et al. (2015), las que más se ajustan a la cadena de suministro estudiada son:

D1 El almacenamiento lo realiza el fabricante, que realiza envíos directos al cliente.

D6 Un minorista almacena el producto y el cliente lo recoge.

- Opciones de recogida

Tal y como dice el caso de estudio que se ha analizado, la recogida se realiza a través de sistemas integrados de gestión (SIG), por lo que esta será la única opción que se planteará:

R5 A través de sistemas integrados de gestión (SIG)

- Opciones de clasificación y evaluación

En el caso de las lavadoras, las operaciones de clasificación y evaluación las lleva a cabo AERESS, por lo que la única opción que se contempla será:

CE2 Descentralizada

- Opciones de reprocesado

La empresa encargada de la gestión de las lavadoras fuera de uso es la Asociación Española de Recuperadores de Economía Social y Solidaria (AERESS) (BSH Electrodomésticos España S.A. 2017), que se encarga de la reparación de las lavadoras fuera de uso, para que estas puedan volver a ser utilizadas por los usuarios tras su compra en los mercados secundarios y, en caso de que estas no se puedan reutilizar, se encargan de su reciclaje. Por tanto, las opciones de reprocesado que se considerarán son:

RP3 Reparación

RP4 Canibalización

RP5 Reciclaje

Especificación de un modo para cada vértice principal de cada transformación de producto.

Una vez determinadas las opciones, se procede a la especificación de los modos para cada vértice principal, en este caso:

El proceso de fabricación tendrá un modo del tipo Mx, ya que al mezclar muchos productos se obtienen lavadoras distintas. La empresa BSH fabrica electrodomésticos de distintas marcas (Bosch, Balay, Siemens, etc.), por lo que las lavadoras obtenidas de los procesos de fabricación tendrán distintas características técnicas, además de distintos acabados y tamaños.

En el momento en que los usuarios llevan la lavadora al punto limpio, o en que se recogen estas en las viviendas, el modo es Me, ya que cuando los usuarios obtienen el producto, este tiene unas características y cuando se envía a los centros de recogida tiene otras distintas, es decir, cuando un usuario adquiere una lavadora, esta tiene capacidad de uso pleno, sin embargo, cuando el usuario decide cambiarla, es porque esta no

En el caso de que las lavadoras se reciclen, se obtendrán varios productos de salida, por lo que se tratará de un modo Md.

El resto de las relaciones de la cadena de suministro, como son la distribución o la clasificación y evaluación, corresponderán al modo Ms, en el que el mismo producto que entra, sale sin sufrir ningún tipo de transformación.

Realización del Gráfico-m

Teniendo en cuenta el proceso de fabricación, los modos y las opciones establecidas, se crea el Gráfico-m que se muestra en la **Error! Reference source not found.**. En este gráfico, las líneas discontinuas representan al producto finalizado, útil, y las líneas continuas el producto fuera de uso.

En el gráfico se aprecia como, a partir de acero inoxidable, chapa, tubos, cables, cristal, plástico y energía se fabrican las lavadoras, que son distribuidas y llevadas hasta los usuarios. Una vez los usuarios deciden desechar la lavadora (ya sea por un mal funcionamiento, porque ha llegado al final de su vida o porque el usuario quiere cambiarla), estas son recogidas en el domicilio de los usuarios o directamente en los puntos municipales de recogida. A continuación, la AERESS clasifica y evalúa las lavadoras obtenidas, de manera que aquellas que se puedan reutilizadas son reparadas y vendidas en mercados secundarios, y las que no pueden ser reutilizadas se reciclan para obtener materias primas que pueden servir de recursos para otras cadenas de suministro.

En el Gráfico-m también se contempla la opción de que el usuario realice devoluciones en garantía. Estas devoluciones una vez llegan a la fábrica, se deben clasificar, de manera que se determine si se pueden reparar para volver a poner en venta, si se pueden reutilizar algunos de sus componentes o si la única opción posible de reprocesado es el reciclaje.

▪ **Etapas 4 Definición de la microestructura de la cadena de suministro.**

Tal y como se mencionó al exponer este caso, las instalaciones donde se lleva a cabo el proceso de producción de las lavadoras tiene lugar en Zaragoza. Hay una nave que se dedica a la fabricación y a aproximadamente 10,5 km de esta, se encuentra la nave dedicada a las actividades de logística. Además de estas instalaciones, existen otras dedicadas a la reparación y reciclaje de lavadoras, que corren a cargo de la empresa contratada para la gestión de las lavadoras fuera de uso.

En cuanto a los medios de transporte usados, en lo que respecta al transporte desde el centro logístico hasta los usuarios finales, se utilizan trenes y barcos para distancias largas y camiones para distancias cortas. En lo que respecta al transporte de los flujos de producto fuera de uso, estos se realizarán mediante camiones.

No se han podido obtener más datos sobre la microestructura de la cadena de suministro, por lo que no se puede definir el Gráfico-μ.

En lo que respecta al modelo matemático, tal y como se ha mencionado una buena opción será la utilización del método MILP, teniendo en cuenta que, al tratarse de una cadena de suministro de lazo cerrado, se ha de tener en cuenta la logística inversa, y por tanto se debe considerar la incertidumbre asociada a los flujos inversos en la cadena de suministro. Dada la complejidad de resolución de este método en casos donde existe incertidumbre, será necesario asumir algunos aspectos de la cadena de suministro.

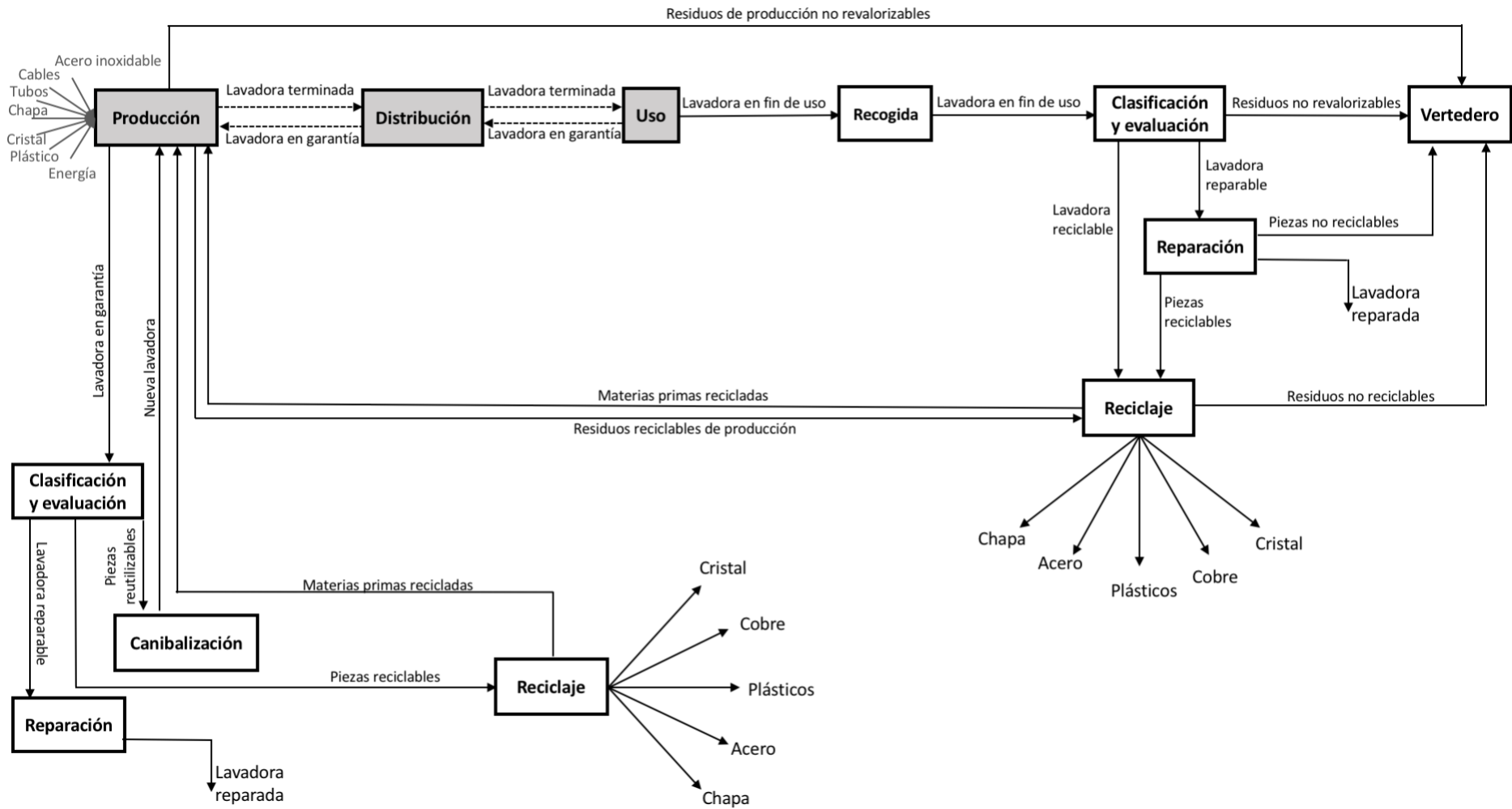


Figura 6. Gráfico-m de la cadena de suministro de lavadoras.

- **Etapas 5: Elección de una configuración de la Cadena de suministro y definición de un protocolo de incidentes.**

Una vez se haya resuelto el modelo matemático, se obtendrán distintas configuraciones posibles de la cadena de suministro conforme a los criterios establecidos inicialmente. Se debe seleccionar una de estas configuraciones y posteriormente definir un protocolo de incidentes para evitar y saber como resolver los errores y fallos que puedan surgir a lo largo de la cadena de suministro.

5.2.2. Caso 2: Diseño de la cadena de suministro de cerveza

En este caso se va a analizar la cadena de suministro de las cervezas. Existe una peculiaridad en esta cadena, ya que, al ser el producto un líquido, necesita envases o tuberías para su transporte y comercialización. Por tanto, no se puede entender la cerveza sin el envase en el que se distribuye.

Se ha estudiado la cadena de suministro del grupo Mahou San Miguel. Esta empresa es una de las más importantes del sector en España, con un 34% de cuota de mercado, aumentando un 3,9% más que el año anterior sus ganancias. En el año 2016 su producción aumentó un 3,9%, consiguiendo producir 13,5 millones de hectolitros de cerveza. (Mahou San Miguel 2016)

La distribución de sus productos se realiza mediante operadores logísticos, que se encargan de la recogida de la mercancía en la fábrica, su transporte, almacenamiento y distribución tanto a empresas hosteleras como a minoristas.

Dado que el producto que se comercializa es una bebida, el principal residuo que habrá que gestionar tras su consumo son los envases en los que esta se ha distribuido. Para ello, Mahou San Miguel se encuentra asociada a Ecovidrio, para reciclar el vidrio, y Ecoembes para el reciclaje de latas y los envases de papel y cartón principalmente.

Entre sus retos de la empresa se encuentra convertirse en la empresa del sector con menor huella ambiental en el año 2020, de manera que consiga pasar de la valorización del 99,8% de los residuos generados actual al 100% en el 2020. De la valorización que hace la empresa, el 39,02% es en operaciones de reutilización, que se realizan en botellines de consumo en hostelería y el 60,98% restante se realiza mediante el reciclaje. (Mahou San Miguel 2016)

A continuación, se aplicará la metodología SCOP a esta cadena de suministro.

- **Etapas 1: Definición del objeto, análisis del entorno y determinación de los objetivos.**

Objeto: Suministrar cerveza a los usuarios finales. Tal y como se mencionó anteriormente, al tratarse de un líquido, el suministro de cerveza no se entiende únicamente por la distribución

de la bebida, sino también la distribución de su envase, ya que no se pueden entender el uno sin el otro.

Entorno: La empresa es una de las empresas líder del mercado cervecero español, que espera un crecimiento de las ventas en los próximos años, es decir, estima aumentar su producción a corto plazo.

Objetivos: El objetivo principal de la empresa es la creación de valor en los negocios. Además, tiene un reto que consiste en convertirse en la empresa del sector con menor huella ambiental en el año 2020. Para poder cumplir con los retos ambientales que se ha propuesto es necesario optimizar la cadena de suministro, reduciendo los recursos empleados en la fabricación de cerveza y reduciendo la cantidad de recursos generados, para así conseguir que la empresa sea más competitiva en el mercado. Por tanto, a la hora de diseñar la cadena de suministro se debe tener en consideración este propósito.

▪ **Etapas 2: Definición de la macroestructura de la cadena de suministro.**

Entre los bloques propuestos, los principales bloques que formarán la cadena de suministro son:

- Bloque P: Incluye las actividades de compras, producción y distribución
- Bloque U: Representa a los usuarios finales
- Bloque M: Representa a los mercados o clientes
- Bloque C: Representa a los puntos de recogida
- Bloque CE: Hace referencia a las actividades de clasificación y evaluación
- Bloque R: Se refiere a las actividades de reprocesado (reutilización, restauración, reparación, canibalización y reciclaje)
- Bloque D: Representa el depósito final del producto en vertederos de manera controlada y de acuerdo con lo establecido en la legislación vigente.

Una vez se han definido los distintos bloques, se formará el Gráfico-M. El proceso de recuperación de los envases sigue dos líneas diferentes dependiendo de si la cerveza está destinada a su consumo en hostelería o a consumo doméstico.

En el caso de la hostelería, los botellines de cerveza son devueltos directamente al fabricante, que los analiza y clasifica, teniendo en cuenta que los botellines se pueden reutilizar únicamente siete u ocho veces. Una vez se han clasificado, si el botellín es reutilizable, se le elimina la etiqueta y se lava para que pueda volver a ser rellenado con cerveza. En caso de que no sea reutilizable, se recicla el vidrio para poder crear botellines de nueva fabricación.

En el caso de que los botellines o latas sean de uso doméstico, son los usuarios los que los llevan a los contenedores o a los puntos limpios de la ciudad, donde el vidrio es recogido por Ecoovidrio y las latas por Ecoembes. Estos envases se clasifican y evalúan y posteriormente se reciclan, de manera que en el caso del vidrio se puedan crear nuevos botellines de distintos volúmenes, y en el caso de las latas se pueden crear bobinas de aluminio, que tendrán múltiples usos.

Todo esto se puede ver de manera gráfica en la Figura 7, donde se distinguen de manera clara estas dos líneas de recuperación en el Gráfico-M.

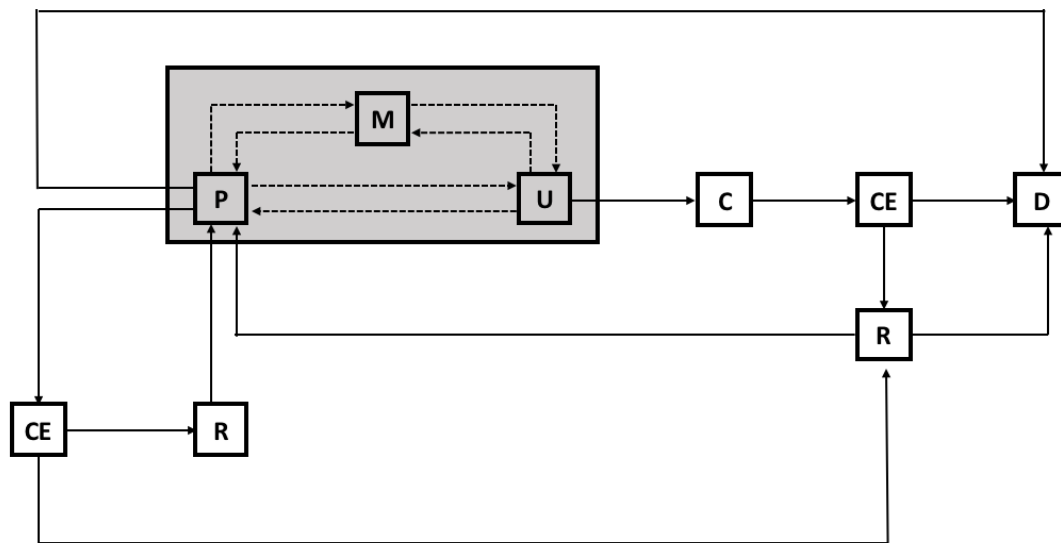


Figura 7. Gráfico-M de una red de reutilización de envases

▪ Etapa 3: Definición de la mesoestructura de la cadena de suministro.

Definición de la estructura del producto y el proceso de producción

La cadena de suministro de la fabricación de la cerveza tiene la siguiente configuración (Fabricando. Made in Spain. 2013a):

1. Llega la malta de cebada en camiones y se almacena en silos
2. En la zona de producción, se mezcla la malta con el agua y se tritura con agua y se aplica calor, de manera que se favorezca la fermentación.
3. Tras dejar reposar 2,5h esta mezcla la envuelta de grano se va al fondo de la tina y sirve de lecho de filtración para “colar” el mosto.
4. Se añade el lúpulo
5. A la hora de rellenar los envases con la cerveza, se deben distinguir distintas líneas en función de su destino final:
 - a. Si la cerveza se va a destinar a consumo doméstico: Se compran latas de cerveza vacías y botellines de nueva fabricación y se llenan con la cerveza.
 - b. Si la cerveza se destina a empresas de hostelería: Si los botellines se destinan al sector hostelero, estos se reutilizan hasta un máximo de siete u ocho veces
6. Una vez se han llenado los envases, un operador logístico los recoge, los almacena y los distribuye a bares y restaurantes y a minoristas.
7. Una vez se ha consumido la cerveza, se genera un residuo: su envase. Mahou San Miguel gestiona los residuos de maneras distintas en función de su procedencia:

- a. Residuos de hostelería: Se trata de botellines de cerveza vacíos. Estos son recogidos por los distribuidores y devueltos a la fábrica, donde se clasifican en botellines reutilizables y no reutilizables en función del número de veces que hayan sido reprocesados. Si estos son reutilizables, se eliminan sus etiquetas, se lavan y se vuelven a rellenar. En caso de que no sean reutilizables, se reciclan.
- b. Residuos domésticos: Los usuarios finales depositan los envases de vidrio y las latas en su contenedor correspondiente, o los llevan directamente a los puntos limpios de la ciudad. Los envases son recogidos por Ecovidrio (en el caso de las botellas de vidrio) y por Ecoembes (en el caso de las latas). Estas empresas se encargan de su gestión y reciclaje. En el caso del vidrio, se fabrican botellas nuevas que pueden ser llevadas de nuevo a la fábrica para ser rellenadas con cerveza, y a partir de las latas se obtiene aluminio.

Opciones para cada actividad o grupo de actividades de la cadena de suministro

Una vez se ha definido la cadena de suministro, se pueden definir las distintas opciones:

- Opciones de compra y producción

En este punto, las opciones están relacionadas sobre todo con las decisiones de hacer o fabricar. Se han tenido en cuenta las opciones propuestas por Corominas et al. (2015) y, además, se tienen en cuenta otras, de manera que las opciones a considerar son:

P4 Comprar a uno o más proveedores a lo largo del tiempo.

P6 Comprar productos reprocesados.

- Opciones de distribución

Las opciones de distribución definidas por Corominas et al. (2015) son:

D3 El almacenamiento lo realiza el distribuidor y un operador de logística entrega el producto a domicilio.

D5 Un minorista almacena el producto y el cliente lo recoge.

- Opciones de recogida

Como se ha mencionado, la recogida de los envases vacíos, en caso de que estos se hayan destinado al consumo hostelero, la realiza directamente los proveedores logísticos externos que se encargan de devolver los envases vacíos al fabricante de cerveza.

En el caso de que los envases se hayan destinado al consumo doméstico, son los propios usuarios los que depositan directamente el envase vacío en el contenedor correspondiente o los llevan a los centros de recogida municipales. Por tanto, las opciones de recogida que se contemplan son:

R3 A través de proveedores de logística externos

R7 Recogida en la acera

R8 En centros de recogida municipales

- Clasificación y evaluación

En este caso, como se ha mencionado anteriormente, existen dos líneas de recogida del envase.

En la de hostelería, los envases de vidrio son devueltos directamente a la fábrica, donde se clasifican y evalúan. En el caso de los envases domésticos, sean de vidrio o latas, son otras empresas las encargadas de realizar estas operaciones. Por tanto, las opciones que se contemplarán en lo que se refiere a clasificación y evaluación son:

CE1 Centralizada

CE2 Descentralizada

- Opciones de reprocesado

Los envases destinados a la hostelería se pueden reutilizar hasta un máximo de siete u ocho veces, mientras que los destinados a consumo doméstico se reciclan. Luego, las opciones de reprocesado son:

RP1 Reutilización

RP5 Reciclaje

Especificación de un modo para cada vértice principal de cada transformación de producto.

A continuación, se procede a la especificación de los modos para cada vértice principal, en este caso:

El proceso de fabricación tendrá un modo del tipo Mc, ya que al mezclar muchos productos se obtiene la cerveza.

Una vez se ha consumido la cerveza destinada a consumo doméstico, que se someterán a procesos de reciclaje, los usuarios llevan el botellín o la lata vacía al contenedor correspondiente, de manera que el modo usado es el Me, ya que las características del producto son distintas antes y después del uso.

También tienen un modo Me los procesos de reciclaje, ya que el producto entra al reciclaje de una forma y sale de otra completamente distinta. Por ejemplo, las latas, al entrar en el proceso de reciclaje tienen todavía la forma de lata que les fue dada para poder contener la cerveza, sin embargo, tras pasar por el proceso de reciclaje, se obtiene aluminio, por ejemplo, en forma de bobina. Sigue siendo el mismo producto, ya que no ha sido ensamblado con otras piezas ni se obtiene de mezclar distintos materiales, sólo que su naturaleza es distinta.

El resto de las relaciones corresponderán al modo Ms, en el que el mismo producto que entra, sale sin sufrir ningún tipo de transformación.

Realización del Gráfico-m

Una vez se ha determinado toda esta información, se crea el Gráfico-m que se muestra en la Figura 8, donde las líneas discontinuas representan a los envases llenos de cerveza, y los productos fuera de uso obtenidos.

Además de los residuos generados tras el consumo de la cerveza, es decir los envases que la contenían, se ha identificado que durante la fabricación de la cerveza se produce el mayor impacto ambiental de toda la cadena, debido a la cantidad de materias primas no renovables, como son el lúpulo, la malta o el agua, que se tienen que emplear. Tras el proceso de fabricación de la cerveza se generarán residuos de tipo orgánico, así como agua residual, que deben ser valorizados.

En el caso de los residuos orgánicos, estos se pueden someter a un tratamiento de compostaje, para obtener compost que pueda usarse en el sector de la agricultura.

En lo que respecta a las aguas residuales, estas deben ser tratadas en una estación depuradora de agua residuales (EDAR). Este tratamiento se puede realizar en la misma fábrica, o las aguas contaminadas se pueden enviar a una EDAR municipal para que sean tratadas, de manera que se obtenga agua depurada, que puede ser devuelta nuevamente al medio. A esta agua depurada se le puede realizar un tratamiento adicional para que pueda ser reutilizada como agua regenerada para uso agrícola, industrial, urbano etc. conforme a lo establecido en el RD 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (Ministerio de la Presidencia 2007).

Además del agua clarificada, se obtienen fangos, que deben ser tratados, de manera que pueda ser utilizado en la agricultura, o puede ser vertido de manera controlada en vertedero.

En lo que respecta a los envases de cerveza vacíos, estos seguirán distintas líneas de tratamiento en función de si son de consumo hostelero o doméstico.

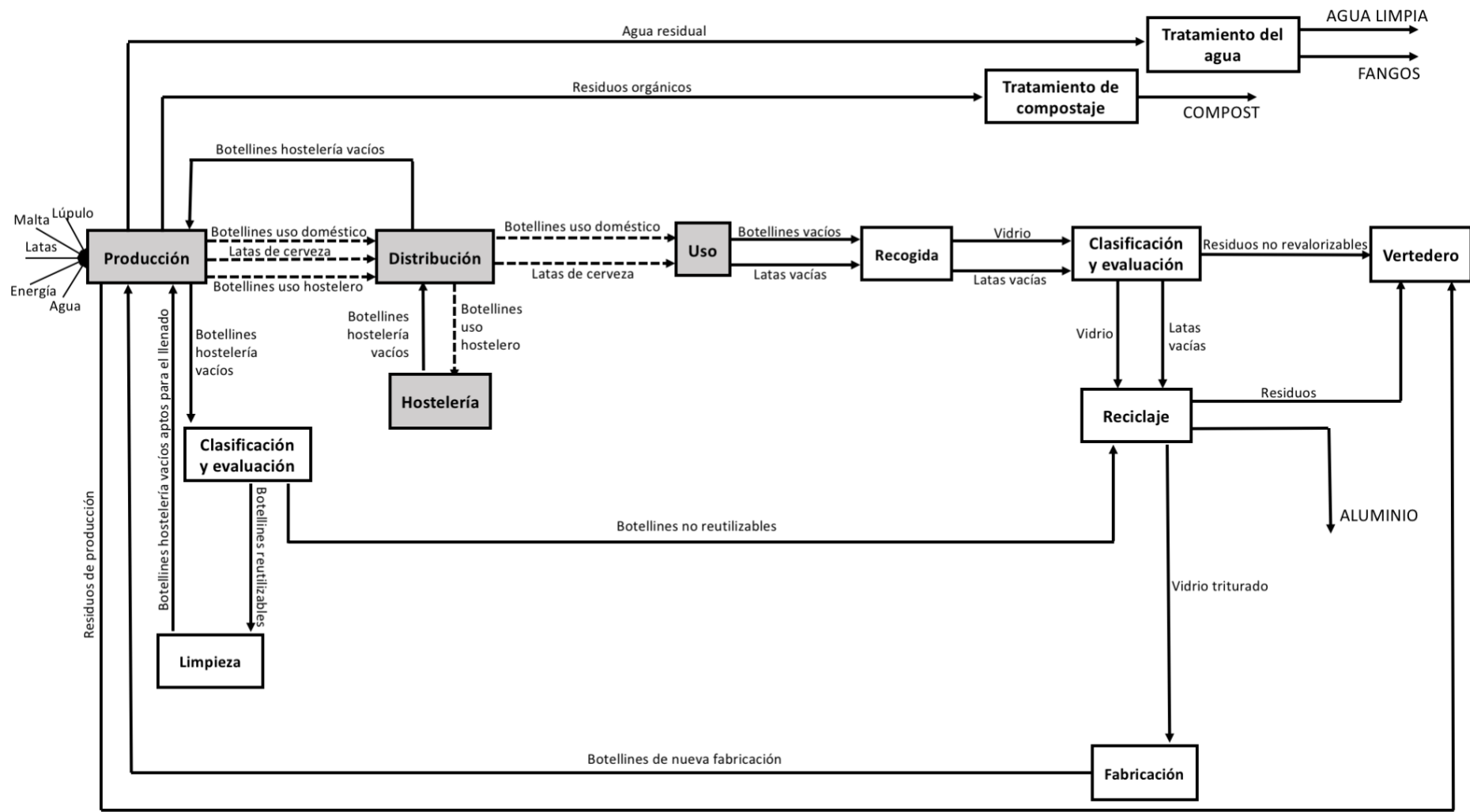


Figura 8. Gráfico-m de la cadena de suministro de la cerveza

▪ **Etapla 4 Definición de la microestructura de la cadena de suministro.**

En España, la compañía cuenta con nueve centros de producción, tal y como se muestra en la Figura 9, con los que suplen la demanda del mercado español y también exportan a países extranjeros. La distribución de sus productos se encuentra cedida a una empresa especialista en logística, y se realiza principalmente mediante camiones.

Para optimizar las decisiones que configuran la cadena de suministro, se puede derivar un modelo de programación matemática del Gráfico- μ . La propia estructura del gráfico y la información asociada facilitan la formulación del modelo. Sin embargo, no se dispone de la información suficiente como para poder desarrollar el Gráfico- μ y así poder formular un modelo matemático.

En caso de tener toda la información necesaria, una vez creado el Gráfico- μ , se podría aplicar un modelo MILP, estableciendo una serie de consideraciones para facilitar la resolución de este modelo matemático, ya que tiene que se debe incorporar al modelo la incertidumbre asociada a los procesos de logística inversa, que hace que su complejidad aumente.



Figura 9. Centros productivos de Mahou San Miguel en el mundo. (Mahou San Miguel 2018)

▪ **Etapla 5: Elección de una configuración de la Cadena de suministro y definición de un protocolo de incidentes.**

Una vez se haya resuelto el modelo matemático, se obtendrán distintas configuraciones posibles de la cadena de suministro conforme a los criterios establecidos inicialmente. Se debe seleccionar una de estas configuraciones y posteriormente definir un protocolo de incidentes para evitar y saber como resolver los errores y fallos que puedan surgir a lo largo de la cadena de suministro.

6. Conclusiones y trabajo futuro

Con la realización de este trabajo se ha podido entender el funcionamiento de la cadena de suministro, así como la importancia de aplicar la logística inversa para conseguir reducir el impacto ambiental. De esta manera, gracias a la minimización de los residuos generados mediante la implantación de operaciones de reprocesado, como son la reutilización, la reparación y el reciclaje, una empresa no sólo puede reducir los residuos enviados a vertedero, sino que también puede recuperar el valor del producto usado.

Se debe resaltar que la incorporación de la logística inversa a una cadena de suministro es una medida preventiva del impacto ambiental, que permite reducir el impacto generado a lo largo de la cadena de suministro, pero en ningún caso permite paliar el impacto previamente generado.

El diseño de la cadena de suministro es un problema estratégico cuya solución influye en gran medida en el rendimiento de la cadena de suministro, por lo que un buen diseño de la cadena de suministro permite gestionar desde el principio de la cadena los distintos flujos de materiales, diferenciando así qué etapas de la cadena de suministro son las que generan mayor impacto ambiental. El diseño de la cadena de suministro debe tener en cuenta los objetivos establecidos por la empresa, ya sean en materia ambiental, económica, legal, etc.

A la hora de diseñar la cadena de suministro de lazo cerrado, se ha decidido seguir el Supply Outline Process (SCOP) propuesto por Corominas et al. (2015) aplicado a un fabricante de electrodomésticos y a la industria cervecera, sin embargo, no se ha podido solucionar el diseño de la cadena de suministro de lazo cerrado de manera precisa debido a la falta de datos reales, por lo que como trabajo futuro se recomienda aplicar esta metodología en un caso real para que se pueda estimar cualitativa y cuantitativamente la reducción del impacto ambiental debida a la incorporación de actividades de logística inversa a lo largo de la cadena de suministro.

Bibliografía

- ABDUL-KADER, W. y HAQUE, M.S., 2011. Sustainable tyre remanufacturing: an agent-based simulation modelling approach. *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 330-347. DOI 10.1080/19397038.2011.581392.
- AGÈNCIA DE RESIDUS DE CATALUNYA, 2009. Valorización Energética ¿Qué es? [en línea]. [Consulta: 5 junio 2018]. Disponible en: http://residus.gencat.cat/es/ambits_dactuacio/valoritzacio_reciclatge/instal_lacions_de_gestio/valoritzacio_energetica/que_es_una_planta_de_valoritzacio_energetica/.
- AGÈNCIA DE RESIDUS DE CATALUNYA, 2012. Beneficios de la minimización de residuos. [en línea]. [Consulta: 9 mayo 2018]. Disponible en: http://residus.gencat.cat/es/ambits_dactuacio/prevencio/estudi_de_minimitzacio_de_residus_especials_1/beneficis_de_la_minimitzacio_de_residus/.
- ÁLVAREZ DEL CASTILLO, M.D., 2017. Residus industrials. Generació/Gestió de residus. *Apunts Gestió d'infraestructures de tractament de residus*. Barcelona: s.n.,
- ANFEL, 2017. Estadísticas. Comparativa Anual ANFEL | Asociación Nacional de Fabricantes e Importadores de Electrodomésticos de Línea Blanca. [en línea]. [Consulta: 4 junio 2018]. Disponible en: <http://www.anfel.org/comparativa-anual>.
- BAÑEGUIL, T.M. y RUBIO, S., 2005. Sistemas de logística inversa en la empresa. *Dirección y Organización. Revista de Ingeniería de Organización* [en línea], vol. 31, pp. 108-116. [Consulta: 25 mayo 2018]. Disponible en: <http://www.revistadyo.com/index.php/dyo/article/view/114/114>.
- BARKER, T.J. y ZABINSKY, Z.B., 2008. Reverse logistics network design: a conceptual framework for decision making. *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 250-260. DOI 10.1080/19397030802591196.
- BARROS, A.I., DEKKER, R. y SCHOLTEN, V., 1998. A two-level network for recycling sand: A case study. *European Journal of Operational Research*, vol. 110, no. 2, pp. 199-214. DOI 10.1016/S0377-2217(98)00093-9.
- BLACKBURN, J.D., GUIDE, V.D.R., SOUZA, G.C. y VAN WASSENHOVE, L.N., 2004. Reverse Supply Chains for Commercial Returns. *California Management Review*, vol. 46, no. 2, pp. 6-22. DOI 10.2307/41166207.
- BSH ELECTRODOMÉSTICOS ESPAÑA S.A., 2017. *Informe Anual 2016* [en línea]. 2017. Zaragoza: BSH Electrodomésticos España S.A. Disponible en: https://media3.bsh-group.com/Documents/MCDOC02280318_Memoria_2017_definitiva.pdf.
- CARRASCO-GALLEGO, R., PONCE-CUETO, E. y DEKKER, R., 2009. A framework for closed-loop supply chains of reusable articles. *Report / Econometric Institute, Erasmus University Rotterdam* [en línea]. S.l.: Erasmus School of Economics. [Consulta: 2 mayo 2018]. Disponible en: <hdl.handle.net/1765/16707>.
- COMISIÓN EUROPEA, 2016. Waste Framework Directive-Inspection and enforcement. [en línea]. [Consulta: 3 mayo 2018]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/inspections.htm>.
- COROMINAS, A., MATEO, M., RIBAS, I. y RUBIO, S., 2015. Methodological elements of supply

- chain design. *International Journal of Production Research*, vol. 53, no. 16, pp. 5017-5030. DOI 10.1080/00207543.2015.1013641.
- DE BRITO, M.P. y DEKKER, R., 2004. A Framework for Reverse Logistics. *Reverse Logistics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 3-27.
- EGIDO ROLDÁN, J., 2012. La logística competitiva 2012. *Foro PILOT 2012* [en línea]. Aragón: BSH Electrodomésticos España, S.A., Disponible en: https://www.aragonempresa.com/descargar.php?a=50&t=paginas_web&i=230&f=e6029c24fc767f759bce68c84498724b.
- EL-SAYED, M., AFIA, N. y EL-KHARBOTLY, A., 2010. A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 58, no. 3, pp. 423-431. DOI 10.1016/J.CIE.2008.09.040.
- EUROSTAT, 2018. Municipal waste by waste operations. [en línea]. [Consulta: 14 mayo 2018]. Disponible en: <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>.
- FABRICANDO. MADE IN SPAIN., 2013a. Así se fabrica la cerveza. RTVE. [en línea]. [Consulta: 4 junio 2018]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=pRXvel27ejk>.
- FABRICANDO. MADE IN SPAIN., 2013b. Así se fabrica una lavadora. RTVE [en línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=taeZO8VrUpU>.
- FLEISCHMANN, M., 2001. *Reverse Logistics Network Structures and Design* [en línea]. 2001. S.l.: s.n. [Consulta: 30 abril 2018]. Disponible en: <https://ssrn.com/abstract=370907>.
- FLEISCHMANN, M., BLOEMHOF-RUWAARD, J.M., BEULLENS, P. y DEKKER, R., 2004. Reverse Logistics Network Design. *Reverse Logistics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 65-94.
- FLEISCHMANN, M., KRIKKE, H.R., DEKKER, R., DOUWE, S. y FLAPPER, P., 2000. A characterisation of logistics networks for product recovery. *Omega*, vol. 28, pp. 653-666. DOI [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(00\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(00)00022-0).
- GOVINDAN, K., SOLEIMANI, H. y KANNAN, D., 2015. Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. , DOI 10.1016/j.ejor.2014.07.012.
- GUIDE, V.D.R., HARRISON, T.P. y VAN WASSENHOVE, L.N., 2003. The Challenge of Closed-Loop Supply Chains. *Interfaces*, vol. 33, no. 6, pp. 3-6. DOI 10.1287/inte.33.6.3.25182.
- GUIDE, V.D.R., JAYARAMAN, V., SRIVASTAVA, R. y BENTON, W.C., 2000. Supply-Chain Management for Recoverable Manufacturing Systems. *Interfaces*, vol. 30, no. 3, pp. 125-142. DOI 10.1287/inte.30.3.125.11656.
- GUIDE, V.D.R., SOUZA, G.C., VAN WASSENHOVE, L.N. y BLACKBURN, J.D., 2006. Time Value of Commercial Product Returns. *Management Science*, vol. 52, no. 8, pp. 1200-1214. DOI 10.1287/mnsc.1060.0522.
- GUIDE, V.D.R. y VAN WASSENHOVE, L.N., 2009. OR FORUM—The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research. *Operations Research*, vol. 57, no. 1, pp. 10-18. DOI 10.1287/opre.1080.0628.
- JANEZ POTOČNIK, 2014. *Speaking points by Environment Commissioner Janez Potočnik on Circular Economy* [en línea]. 2014. S.l.: s.n. [Consulta: 23 mayo 2018]. Disponible en:

- http://europa.eu/rapid/press-release_SPEECH-14-527_en.htm.
- JAYARAMAN, V., GUIDE, V.D.R. y SRIVASTAVA, R., 1999. A closed-loop logistics model for remanufacturing. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 50, no. 5, pp. 497-508. DOI 10.1057/palgrave.jors.2600716.
- KUMAR, S. y CRAIG, S., 2007. Dell, Inc.'s closed loop supply chain for computer assembly plants. *Information Knowledge Systems Management* [en línea], vol. 6, no. 3, pp. 197-214. [Consulta: 3 mayo 2018]. Disponible en: <https://content.iospress.com/articles/information-knowledge-systems-management/iks00100>.
- MAHOU SAN MIGUEL, 2016. *Memoria Anual 2016* [en línea]. 2016. Madrid: s.n. [Consulta: 4 junio 2018]. Disponible en: <http://www.mahou-sanmiguel.com/es-es/documentos/msm2016-esp.pdf>.
- MAHOU SAN MIGUEL, 2018. Nuestros centros productivos. [en línea]. [Consulta: 4 junio 2018]. Disponible en: <https://www.mahou-sanmiguel.com/es-es/sobre-nosotros/nuestras-fabricas.html>.
- MEEPETCHDEE, Y. y SHAH, N., 2007. Logistical network design with robustness and complexity considerations. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 37, no. 3, pp. 201-222. DOI <https://doi.org/10.1108/09600030710742425>.
- MEHDI KESHAVARZ GHORABAE, MAGHSOUD AMIRI, LAYA OLFAT y S. M. ALI KHATAMI FIROUZABADI, 2017. DESIGNING A MULTI-PRODUCT MULTI-PERIOD SUPPLY CHAIN NETWORK WITH REVERSE LOGISTICS AND MULTIPLE OBJECTIVES UNDER UNCERTAINTY. *Technological and Economic Development of Economy*, vol. 23, no. 3, pp. 520-548. DOI 10.3846/20294913.2017.1312630.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, A. y M.A., 2013. *Orden AAA/661/2013, de 18 de abril, por la que se modifican los anexos I, II y III del Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*. 2013. S.l.: s.n.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, 2015. *Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos*. [en línea]. 2015. S.l.: s.n. 110/2015. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2015/02/21/pdfs/BOE-A-2015-1762.pdf>.
- MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, 2007. *Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas*. [en línea]. 2007. S.l.: s.n. 1620/2007. Disponible en: <http://boe.es/boe/dias/2007/12/08/pdfs/A50639-50661.pdf>.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, 2002. *Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*. [en línea]. 2002. S.l.: s.n. 1481/2001. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2002/01/29/pdfs/A03507-03521.pdf>.
- ORTEGA MIER, M.Á., 2003. Tipología de flujos en la Logística Inversa. *V Congreso de Ingeniería de Organización* [en línea]. Valladolid: s.n., [Consulta: 9 abril 2018]. Disponible en: http://www.adingor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2003//Art_102.pdf.
- ORTEGA MIER, M.Á., 2008. *Utilización de métodos cuantitativos para el análisis de problemas de localización en logística inversa* [en línea]. S.l.: Universidad Politécnica de Madrid.

- [Consulta: 25 mayo 2018]. Disponible en:
http://oa.upm.es/1738/1/MIGUEL_ANGEL_ORTEGA_MIER.pdf.
- PARLAMENTO EUROPEO y CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA, 2008. DIRECTIVA 2008/33/CE. *Diario Oficial de la Unión Europea* [en línea], vol. 81, pp. 62-64. [Consulta: 4 junio 2018]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0033&from=ES>.
- PISHVAEE, M.S., FARAHANI, R.Z. y DULLAERT, W., 2010. A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. *Computers & Operations Research*, vol. 37, no. 6, pp. 1100-1112. DOI 10.1016/J.COR.2009.09.018.
- SARKIS, J., ZHU, Q. y LAI, K., 2011. An organizational theoretic review of green supply chain management literature. *International Journal of Production Economics*, vol. 130, no. 1, pp. 1-15. DOI 10.1016/J.IJPE.2010.11.010.
- SARMENTERO REGUEIRA, J.C., 2010. *Impacto de la Logística Inversa en el Mercado del Cobre en España* [en línea]. S.l.: s.n. [Consulta: 4 abril 2018]. Disponible en: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/9886/Tesis Master pd.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/9886/Tesis%20Master.pdf?sequence=2&isAllowed=y).
- SAS, I., THONEY, K.A., JOINES, J.A., KING, R.E. y WOOLARD, R., 2015. Reverse Logistics of US Carpet Recycling. *Sustainable Fashion Supply Chain Management*. Cham: Springer International Publishing, pp. 3-30.
- SCHULTMANN, F., ENGELS, B. y RENTZ, O., 2003. Closed-Loop Supply Chains for Spent Batteries. *Interfaces*, vol. 33, pp. 57-71. DOI <http://dx.doi.org/10.1287/inte.33.6.57.25183>.
- SCHULTMANN, F., ZUMKELLER, M. y RENTZ, O., 2006. Modeling reverse logistic tasks within closed-loop supply chains: An example from the automotive industry. *European Journal of Operational Research*, vol. 171, no. 3, pp. 1033-1050. DOI 10.1016/J.EJOR.2005.01.016.
- SOUZA, G.C., 2014. Closed-Loop Supply Chains with Remanufacturing. *INFORMS Tutorials in Operations Research Publication*, pp. 130-15. DOI 10.1287/educ.1080.0040.
- THIERRY, M., SALOMON, M., VAN NUNEN, J. y VAN WASSENHOVE, L., 1995. Strategic Issues in Product Recovery Management. *California Management Review*, vol. 37, no. 2, pp. 114-136. DOI 10.2307/41165792.
- UNIÓN EUROPEA, 1994. *Directiva 94/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre de 1994 relativa a los envases y residuos de envases* [en línea]. 1994. S.l.: s.n. [Consulta: 1 mayo 2018]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:31994L0062&from=ES>.
- UNIÓN EUROPEA, 2003. *Decisión del Consejo, de 19 de diciembre de 2002, por la que se establecen los criterios y procedimientos de admisión de residuos en los vertederos con arreglo al artículo 16 y al anexo II de la Directiva 1999/31/CEE* [en línea]. 2003. S.l.: s.n. [Consulta: 3 mayo 2018]. 2003/33/CE. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003D0033&from=EN>.
- UNIÓN EUROPEA, 2008. *Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas* [en línea]. 2008. S.l.: s.n. [Consulta: 3 mayo 2018]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=ES>.

- UNIÓN EUROPEA, 2012. *Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)* [en línea]. 2012. S.l.: s.n. [Consulta: 3 mayo 2018]. 2012/19/UE. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&from=en>.
- VAN DALEN, J., VAN NUNEN, J.A.E.E. y WILENS, C.M., 2005. The chip in crate: the Heineken case. *Managing Closed-Loop Supply Chains*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 43-55.
- VITASEK, K., 2013. Supply Chain Management Terms Glossary. *Council of Supply Chain Management Professionals*. S.l.:
- YU, H. y SOLVANG, W.D., 2018. Improving the Decision-Making of Reverse Logistics Network Design Part I: A MILP Model Under Stochastic Environment. . S.l.: s.n., pp. 431-438.
- ZAREI, M., MANSOUR, S., HUSSEINZADEH KASHAN, A. y KARIMI, B., 2010. Designing a Reverse Logistics Network for End-of-Life Vehicles Recovery. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2010, pp. 1-16. DOI 10.1155/2010/649028.